



TESIS-TM 142501

**OPTIMASI MULTI RESPON PROSES GURDI GLASS
FIBER REINFORCED POLYMER-STAINLESS STEEL
STACKS DENGAN METODE BACKPROPAGATION
NEURAL NETWORK-GENETIC ALGORITHM
(BPNN-GA)**

ANGGA SATERIA
NRP 2115201003

DOSEN PEMBIMBING
Ir. Bobby O. P. Soepangkat, M.Sc., Ph.D.

PROGRAM MAGISTER
BIDANG KEAHLIAN REKAYASA DAN SISTEM MANUFAKTUR
DEPARTEMEN TEKNIK MESIN
FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
SURABAYA
2017



TESIS - TM 142501

OPTIMASI MULTI RESPON PROSES GURDI *GLASS FIBER REINFORCED POLYMER-STAINLESS STEEL STACKS* DENGAN METODE *BACKPROPAGATION NEURAL NETWORK-GENETIC ALGORITHM* (BPNN-GA)

ANGGA SATERIA
NRP 2115201003

Dosen Pembimbing
Ir. Bobby Oedy P. Soepangkat, M.Sc., Ph.D.

PROGRAM MAGISTER
BIDANG KEAHLIAN REKAYASA DAN SISTEM MANUFAKTUR
DEPARTEMEN TEKNIK MESIN
FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
SURABAYA
2017



THESIS - TM 142501

**MULTI RESPONSE OPTIMIZATION DRILLING OF
GLASS FIBER REINFORCED POLYMER-STAINLESS
STEEL STACKS USING BACKPROPAGATION
NEURAL NETWORK-GENETIC ALGORITHM
METHOD (BPNN-GA)**

ANGGA SATERIA
NRP 2115201003

Advisor
Ir. Bobby Oedy P. Soepangkat, M.Sc., Ph.D.

MASTER PROGRAM
FIELD STUDY OF ENGINEERING AND MANUFACTURING SYSTEM
DEPARTEMENT OF MECHANICAL ENGINEERING
FACULTY OF INDUSTRIAL TECHNOLOGY
SEPULUH NOPEMBER INSTITUTE OF TECHNOLOGY
SURABAYA
2017

LEMBAR PENGESAHAN TESIS

Tesis disusun untuk memenuhi salah satu syarat memperoleh gelar
Magister Teknik (M.T)
di
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh:
Angga Sateria
NRP. 2115201003

Tanggal Ujian : 14 Juli 2017
Periode Wisuda : September 2017

Disetujui oleh:



1. Ir. Bobby O. P. Soepangkat, M.Sc. Ph.D.
NIP: 195305161978031001

(Pembimbing)

2. Prof. Dr. Ing. Ir. Suhardjono, M.Sc.
NIP: 196206041987011001

(Penguji)

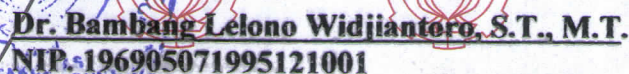
3. Dr. Eng. Sutikno, S.T., M.T.
NIP: 197407032000031001

(Penguji)

4. Arif Wahyudi, S.T., M.T., Ph.D.
NIP: 197303222001121001

(Penguji)

Dekan Fakultas Teknologi Industri


Dr. Bambang Lelono Widjiantoro, S.T., M.T.
NIP. 196905071995121001

OPTIMASI MULTI RESPON PROSES GURDI *GLASS FIBER REINFORCED POLYMER* (GFRP)-*STAINLESS STEEL STACKS* DENGAN METODE BPNN-GA

Nama Mahasiswa : Angga Sateria
NRP : 2115201003
Pembimbing : Ir. Bobby O. P. Soepangkat, M.Sc., PhD.

ABSTRAK

Glass fiber reinforced polymer (GFRP) yang direkatkan dengan *Stainless steel* (SS) atau GFRP-stainless steel stacks digunakan pada bagian badan pesawat terbang. Penyambungan dari material GFRP-SS dilakukan dengan menggunakan baut yang membutuhkan banyak lubang. Pembuatan lubang pada material GFRP-SS dilakukan dengan menggunakan proses gurdi. Lubang hasil penggurdian yang tidak sesuai dengan spesifikasi akan menyebabkan kegagalan pada sambungan. Untuk menghasilkan lubang yang sesuai dengan spesifikasi, dibutuhkan pemilihan parameter proses penggurdian yang tepat dengan melakukan optimasi terhadap *critical to quality characteristics* (CTQs) dari lubang. CTQs dari lubang hasil proses penggurdian antara lain adalah gaya tekan, momen torsi, kekasaran permukaan lubang dan delaminasi. Spesifikasi dari keempat CTQs tersebut adalah semakin kecil semakin baik (*smaller the better*). Agar spesifikasi dari keempat CTQs tersebut tercapai, maka perlu dilakukan optimasi multirespon.

Penelitian ini dilakukan untuk menentukan pengaturan level-level dari parameter-parameter proses gurdi GFRP-SS agar dapat meminimalkan parameter-parameter respon yang berupa gaya tekan, momen torsi, kekasaran permukaan lubang dan delaminasi. Eksperimen dilakukan dengan memvariasikan tiga parameter proses yang masing-masing memiliki 3 level, yaitu kecepatan spindel, kecepatan makan dan sudut ujung pahat. Kecepatan spindel divariasikan sebesar 600 rpm, 1500 rpm, dan 2400 rpm. Kecepatan makan divariasikan sebesar 60 mm/menit, 90 mm/menit, dan 120 mm/menit, serta sudut ujung pahat divariasikan sebesar 118°, 130°, dan 140°. Rancangan eksperimen ditetapkan dengan menggunakan rancangan faktorial 3 x 3 x 3, dan replikasi dilakukan sebanyak tiga kali. Gaya tekan dan momen torsi diukur dengan menggunakan dinamometer, kekasaran permukaan lubang diukur menggunakan *surface roughness tester*, dan delaminasi diukur dengan cara membuat perbandingan antara diameter maksimum delaminasi yang diamati dengan diameter lubang nominal. Optimasi dilakukan dengan menggunakan gabungan metode *backpropagation neural network* (BPNN) dan *genetic algorithm* (GA).

Pengembangan jaringan BPNN menghasilkan arsitektur jaringan 3-13-13-4, yang mempunyai arti jaringan memiliki 3 *input layer*, 2 *hidden layer* dengan 13 *neuron* pada masing-masing *hidden layer*, dan 4 *output layer*. Fungsi-fungsi aktivasi yang digunakan secara berurutan adalah tansig untuk masing-masing *hidden layer*, purelin untuk *output layer* dan trainlm untuk fungsi *training*

jaringan. Optimasi GA menghasilkan kombinasi parameter-parameter yang dapat meminimalkan gaya tekan, momen torsi, kekasaran permukaan lubang dan delaminasi secara serentak dengan kecepatan spindel sebesar 2343 rpm, kecepatan makan sebesar 61 mm/menit dan sudut ujung pahat sebesar 118° .

Kata kunci: BPNN-GA, GFRP-SS, optimasi multirespon, proses gurdi.

MULTI-RESPONSE OPTIMIZATION DRILLING OF GLASS FIBER REINFORCED POLYMER (GFRP)-STAINLESS STEEL STACKS USING BPNN-GA METHOD

By : Angga Sateria

Student Identity Number : 2115201003

Supervisor : Ir. Bobby O. P. Soepangkat, M.Sc., PhD.

ABSTRACT

Glass fiber reinforced polymer (GFRP)-stainless steel stacks used in the aircraft structural components. The assembly process of this components requires mechanical joining using bolt and nut. Conventional drilling process is commonly used for producing hole to position the bolt correctly. Drilling is the complex machining process due to the variation in geometical chance along the cutting edge. Thrust force, torque, hole surface roughness, and delamination are some responses that used to evaluate the performance of drilling process. The quality characteristic of these response are “smaller-is-better.” The aim of this experiment is to identify the combination of process parameters for achieving required multiple performance characteristic in drilling process of GFRP-stainless steel stacks materials. The three important process parameters such as spindle speed, feed speed and point angle were used as input parameters. All the process parameters were set at three different levels. Hence, a 3 x 3 x 3 full factorial was used as design experiments. The experiments were replicated three times. The optimization was conducted by using the combination of backpropagation neural network method and genetic algorithm method. The architecture of developed BPNN network had 3 input layers, 2 hidden layers with 13 neurons and 4 output layers. The activation functions of hidden layer, output layer and network training were tansig, purelin and trainlm respectively. The minimum thrust force, torque, hole surface roughness, and delamination could be obtained by using spindle speed, feed speed and point angle of 2343 rpm, 61 mm/min and 118° respectively.

Keywords: BPNN-GA, multi-response optimization, drilling process, GFRP-stainless steel stacks.

KATA PENGANTAR

Alhamdulillah. Segala puji dan syukur kehadiran Allah SWT yang telah melimpahkan segala berkah dan rahmat-Nya, sehingga penulis dapat menyelesaikan tesis ini. Tesis dengan judul “**OPTIMASI MULTI RESPON PROSES GURDI GLASS FIBER REINFORCED POLYMER (GFRP)-STAINLESS STEEL STACKS DENGAN METODE BACKPROPAGATION NEURAL NETWORK–GENETIC ALGORITHM (BPNN-GA)**” disusun sebagai persyaratan untuk memperoleh gelar Magister Teknik pada Program Studi Rekayasa dan Sistem Manufaktur, Departemen Teknik Mesin, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya.

Adapun keberhasilan penulisan dalam penyusunan laporan ini tidak lepas berbagi pihak yang telah banyak memberikan bantuan, motivasi, dan dukungan. Untuk itu penulis ingin menyampaikan ucapan terima kasih dan penghargaan yang sebesar-besarnya kepada :

1. Bapak **Ir. Bobby O. P. Soepangkat, M.Sc., Ph.D.** selaku dosen pembimbing yang telah memberikan saran serta bimbinganya sehingga penulis mampu menyelesaikan tesis ini.
2. Bapak **Prof. Dr.Eng. Ir. Prabowo, M.Eng** Kepala Program Studi Pascasarjana Departemen Teknik Mesin FTI-ITS.
3. Bapak **Prof. Dr.Eng. Ir. Suhardjono, M.Sc.**, bapak **Arif Wahjudi, S.T., M.T., Ph.D.**, dan bapak **Dr.Eng. Sutikno, S.T., M.T.** sebagai dosen penguji, atas saran dan masukan yang telah diberikan untuk menyempurnakan tesis ini.
4. Bapak **Bayu Nuraga Wibawa**, sebagai *Manager Production Engineering Shop* GMF AeroAsia.
5. Bapak **Prof. Ir. Budi Santosa, M.Sc., Ph.D.** dari Departemen Teknik Industri FTI-ITS yang telah memberi kesempatan untuk mengikuti kuliah Metode Metaheuristik.
6. **Istri, anak, orang tua, serta keluarga** yang selalu memberikan doa dan dukungannya kepada saya.

7. **Teman–teman seperjuangan Pascasarjana Teknik Mesin 2014, 2015 dan 2016** atas segala canda, tawa dan ilmu dibagikan selama ini.
8. **Rachmadi Norcahyo** sebagai rekan dalam pengerjaan tesis ini atas dukungan, bantuan dan kerjasamanya.
9. Rekan-rekan karyawan Lab. Manufaktur **Pak Faisal** dan **Pak Sugianto**, atas support dan bantuannya.
10. Siswa SMK PSG Lab. Manufaktur **Irsyam** dan **Gifary** atas bantuannya selama proses penelitian.
11. Seluruh staf dan karyawan Departemen Teknik Mesin.
12. Semua pihak yang tidak dapat kami sebutkan satu persatu, kami ucapkan terima kasih.

Penulis menyadari sepenuhnya bahwa penyusunan laporan tesis ini masih belum sempurna, untuk itu kritik dan saran yang membangun sangat penulis harapkan. Akhir kata penulis berdoa agar segala bantuan yang diberikan akan mendapat balasan dan rahmat dari Allah SWT. Dan semoga hasil dari laporan tugas akhir ini dapat bermanfaat sebagaimana yang diharapkan. Amin

Surabaya, Juli 2017

Penulis

DAFTAR ISI

	Hal
HALAMAN JUDUL INDONESIA.....	i
HALAMAN JUDUL INGGRIS.....	ii
LEMBAR PENGESAHAN.....	iii
ABSTRAK	iv
ABSTRACT.....	v
KATA PENGANTAR.....	vi
DAFTAR ISI	viii
DAFTAR GAMBAR	xii
DAFTAR TABEL	xiv
BAB 1 PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	4
1.2.1 Batasan Masalah.....	4
1.2.2 Asumsi Penelitian.....	5
1.3 Tujuan Penelitian.....	5
1.4 Manfaat Penelitian	6
BAB 2 DASAR TEORI.....	7
2.1 Proses Pemesinan Gurdi.....	7
2.1.1 Geometri Pahat	8
2.1.2 Gaya Pemotongan pada Proses Gurdi	9
2.2 Material Komposit	13
2.2.1 Klasifikasi Material Komposit.....	15
2.2.2 <i>Fiber Reinforced Composite Material</i>	17
2.2.3 <i>Polymer Matrix Composite</i>	17
2.2.4 <i>Multi Directional Aramid/Epoxy</i>	18
2.3 Baja Tahan Karat (<i>Stainless Steel</i>).....	18
2.3.1 Klasifikasi dan Komposisi <i>Stainless Steel</i>	19
2.4 Kekasaran Permukaan Benda Kerja.....	20
2.5 Delaminasi.....	24
2.6 Jaringan Syaraf Tiruan (<i>Artificial Neural Network</i>).....	26
2.6.1 Arsitektur Jaringan.....	27
2.6.2 Fungsi Aktivasi.....	28
2.6.3 Pelatihan Standar BPNN.....	29

2.6.4	Arsitektur BPNN.....	30
2.6.5	<i>Preprocessing</i> data eksperimen.....	32
2.6.6	Perhitungan hasil peramalan dengan BPNN.....	33
2.6	Optimasi Proses dengan Metode <i>Genetic Algorithm</i> (GA).....	33
2.7	Ekperimen Konfirmasi.....	39
BAB 3	METODOLOGI PENELITIAN.....	41
3.1	Tahapan Penelitian	41
3.2	Parameter Penelitian.....	43
3.3	Bahan dan Peralatan Penelitian	43
3.3.1	Bahan Penelitian	44
3.3.2	Peralatan Penelitian.....	45
3.4	Rancangan Percobaan.....	50
3.4.1	Pengaturan Parameter Proses pada Mesin.....	50
3.4.2	Pemilihan Rancangan Percobaan.....	50
3.5	Prosedur Percobaan	51
3.6	Pengukuran Data Respon.....	53
3.6.1	Pengukuran Gaya Tekan dan Momen Torsi.....	53
3.6.2	Pengukuran Kekasaran Permukaan Lubang.....	56
3.6.3	Pengukuran Delaminasi.....	56
3.7	Karakteristik Respon Optimal.....	57
3.8	Metode Optimasi Menggunakan BPNN-GA.....	57
BAB 4	OPTIMASI MULTI RESPON DAN PEMBAHASAN.....	65
4.1	Data Hasil Pengukuran.....	65
4.2	Metode Peramalan BPNN.....	68
4.2.1	<i>Pre-processing</i> (normalisasi) data <i>input</i> dan <i>output</i>	68
4.2.2	Penentuan Arsitektur Jaringan.....	71
4.2.3	Kriteria Pemberhentian Pelatihan BPNN.....	75
4.2.4	Data Peramalan BPNN.....	75
4.3	Metode Optimasi <i>Genetic Algorithm</i> (GA).....	79
4.3.1	Penentuan Fungsi <i>Fitness</i>	80
4.3.2	Penentuan Batas Atas dan Batas Bawah parameter yang akan dioptimasi	81
4.3.3	Pengubahan Seting Hasil Optimasi Sudut Ujung Pahat Berdasarkan Level.....	82
4.3.4	Penentuan Parameter-Parameter Optimasi GA.....	82
4.4	Hasil Optimasi GA.....	83

4.5 Eksperimen konfirmasi.....	83
4.6 Pengujian Kesamaan Rata-rata Hasil Eksperimen Konfirmasi dengan Hasil Prediksi BPNN-GA	84
4.7 Pengaruh Parameter Proses terhadap Parameter Respon.....	86
4.7.1 Pengaruh Parameter Proses terhadap Gaya Tekan.....	86
4.7.2 Pengaruh Parameter Proses terhadap Momen Torsi.....	90
4.7.3 Pengaruh Parameter Proses terhadap Kekasaran Permukaan Lubang.	92
4.7.4 Pengaruh Parameter Proses terhadap Delaminasi.....	94
BAB 5 KESIMPULAN DAN SARAN.....	98
5.1 Kesimpulan.....	98
5.2 Saran.....	98
D	
A	
DAFTAR PUSTAKA	
LAMPIRAN	

DAFTAR GAMBAR

	Hal
Gambar 2.1	Proses Menggurdi..... 7
Gambar 2.2	Mesin Gurdi 8
Gambar 2.3	Geometri Pahat Gurdi 9
Gambar 2.4	Lingkaran Gaya Pemotongan 10
Gambar 2.5	Gaya Pemotongan Pada Proses Gurdi 11
Gambar 2.6	Komposisi Material Komposit..... 13
Gambar 2.7	Klasifikasi Komposit Berdasarkan Matriksnya 16
Gambar 2.8	Klasifikasi Komposit Berdasarkan Strukturnya 16
Gambar 2.9	Penyimpangan Rata-Rata Aritmatika..... 21
Gambar 2.10	Skema Delaminasi Pada Komposit Laminat..... 25
Gambar 2.11	Ilustrasi dari Skema Pengukuran Faktor Delaminasi 25
Gambar 2.12	Jaringan Layar Tunggal..... 28
Gambar 2.13	Jaringan Layar Jamak..... 28
Gambar 2.14	Model <i>Crossover</i> Satu Titik 38
Gambar 2.15	Model <i>Crossover</i> Dua Titik 38
Gambar 2.16	Model <i>Crossover</i> Banyak Titik..... 38
Gambar 3.1	Diagram Alir Metodologi Penelitian 41
Gambar 3.1	Diagram Alir Metodologi Penelitian (lanjutan)..... 42
Gambar 3.2	Pahat Karbida <i>Twist Drill</i> 44
Gambar 3.3	Ukuran Spesimen GFRP/ <i>Stainless Steel Stacks</i> 45
Gambar 3.4	Mesin CNC <i>Brother TC-22A</i> 45
Gambar 3.5	Dinamometer Tipe 9272..... 46
Gambar 3.6	Alat Akusisi Data Tipe 5697A 46
Gambar 3.7	<i>Charge Amplifier</i> Tipe 5070A 47
Gambar 3.8	<i>Notebook</i> dengan Perangkat Lunak <i>DynoWare</i> 47
Gambar 3.9	Mitutoyo Surf test SJ-310..... 48
Gambar 3.10	Mikroskop Makro..... 48
Gambar 3.11	Mistar Ingsut 48
Gambar 3.12	<i>Drill Resharpening Grinder</i> 49
Gambar 3.13	Jarak Antar Lubang pada Penggurdian Benda Kerja..... 51
Gambar 3.14	Dinamometer Beserta Kelengkapannya..... 52
Gambar 3.15	<i>Jig</i> untuk Spesimen Benda Kerja..... 52
Gambar 3.16	Grafik Pengukuran Gaya Tekan dan Momen Torsi..... 54
Gambar 3.17	Panjang Ujung Pahat dan Lebar Pemotongan..... 55
Gambar 3.18	Diagram Alir Metode BPNN-GA..... 59
Gambar 3.18	Diagram Alir Metode BPNN-GA (lanjutan)..... 59
Gambar 3.19	Diagram Alir Penentuan Jumlah <i>Neuron</i> dan <i>Hidden Layer</i> yang Menghasilkan MSE Terkecil pada BPNN..... 62
Gambar 4.1	Pemilihan Jumlah <i>Neuron</i> yang Menghasilkan MSE Terkecil..... 73
Gambar 4.2	Pemilihan Jumlah <i>Hidden Layer</i> yang Menghasilkan MSE Terkecil..... 74
Gambar 4.3	Arsitektur Jaringan yang Dipilih..... 74
Gambar 4.4	Grafik Data Eksperimen dan <i>Output</i> Prediksi BPNN untuk Data <i>Training</i> 77
Gambar 4.5	Grafik Data Eksperimen dan <i>Output</i> Prediksi BPNN untuk

	<i>Data Testing</i>	78
Gambar 4.6	Grafik Data Eksperimen dan <i>Output</i> Prediksi BPNN untuk Data Validasi.....	79
Gambar 4.7	Pengaruh Kecepatan Spindel terhadap Gaya Tekan dengan Variasi Kecepatan Makan.....	87
Gambar 4.8	Pengaruh Kecepatan Makan terhadap Gaya Tekan dengan Variasi Kecepatan Spindel.....	88
Gambar 4.9	Pengaruh Kecepatan Spindel terhadap Momen Torsi dengan Variasi Kecepatan Makan.....	90
Gambar 4.10	Pengaruh Kecepatan Makan terhadap Momen Torsi dengan Variasi Kecepatan Spindel.....	91
Gambar 4.11	Pengaruh Kecepatan Spindel terhadap Kekasaran Permukaan Lubang dengan Variasi Kecepatan Makan.....	92
Gambar 4.12	Pengaruh Kecepatan Makan terhadap Kekasaran Permukaan Lubang dengan Variasi Kecepatan Spindel.....	93
Gambar 4.13	Pengaruh Kecepatan Spindel terhadap Delaminasi dengan Variasi Kecepatan Makan.....	94
Gambar 4.14	Hasil Pengukuran Delaminasi dengan Variasi Kecepatan Spindel.....	95
Gambar 4.15	Pengaruh Kecepatan Makan terhadap Delaminasi dengan Variasi Kecepatan Spindel.....	96
Gambar 4.16	Hasil Pengukuran Delaminasi dengan Variasi Kecepatan Makan.....	96
Gambar 4.17	Hasil Pengukuran Delaminasi dengan Variasi Sudut Ujung Pahat.....	97

DAFTAR TABEL

	Hal
Tabel 2.1 Nilai Kekasaran dan Tingkat Kekasaran.....	22
Tabel 2.2 Nilai Kekasaran yang Dicapai oleh Beberapa Pengerjaan.....	23
Tabel 3.1 Parameter Proses dan Masing-Masing Level.....	50
Tabel 3.2 Desain Eksperimen Faktorial 3 x 3 x 3.....	50
Tabel 4.1 Data Hasil Eksperimen.....	65
Tabel 4.2 Normalisasi Nilai Parameter Proses dan Respon.....	69
Tabel 4.3 Kombinasi Parameter BPNN untuk Penentuan Jumlah <i>Neuron</i>	72
Tabel 4.4 Kombinasi Parameter BPNN untuk Penentuan Jumlah <i>Hidden Layer</i>	73
Tabel 4.5 Data <i>Training</i>	75
Tabel 4.6 Data <i>Testing</i>	77
Tabel 4.7 Data Validasi.....	78
Tabel 4.8 Nilai-Nilai Batas Bawah dan Batas Atas Parameter Proses.....	81
Tabel 4.9 Nilai-Nilai Batas Bawah dan Batas Atas setelah Pengubahan.	82
Tabel 4.10 Hasil Seting Optimasi GA dan prediksi BPNN.....	83
Tabel 4.11 Hasil Eksperimen Konfirmasi.....	84
Tabel 4.12 Data Hasil Eksperimen.....	89



BAB 1 PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Dalam perkembangan teknologi industri terutama industri manufaktur membutuhkan material yang mempunyai sifat-sifat yang istimewa yang sulit didapatkan dari material konvensional seperti besi dan aluminium. Komposit merupakan jenis material alternatif yang dapat digunakan untuk memenuhi kebutuhan tersebut. Kelebihan material komposit dibandingkan dengan jenis material konvensional adalah kekuatan tarik tinggi, ringan, ketahanan korosi, ketahanan aus dan arah kekuatan dapat dikendalikan (Palanikumar dkk., 2012).

Industri pesawat terbang banyak menggunakan material komposit terutama digunakan pada komponen struktur pesawat yang bertujuan untuk penurunan berat dari pesawat. Sekitar 30% dari bagian pesawat *Boeing 767* terdiri dari material komposit (Gay dkk., 2003). Jumlah komposit yang digunakan di *Boeing 787* dan *Airbus A350* meningkat secara signifikan dan lebih dari 50% dari seluruh bagian pesawat (Shyha dkk., 2010). Oleh karena itu, industri kedirgantaraan umumnya menggunakan material komposit sebagai pengganti bahan logam, karena sifat unggul yang dimiliki oleh material komposit seperti memiliki kekuatan dan kekakuan yang baik dan dapat meminimalkan berat.

Komposit yang saat ini banyak digunakan adalah komposit dengan fasa penguat berupa serat atau FRC (*fiber reinforced composite*). Satu diantaranya adalah polimer yang diperkuat serat gelas atau GFRP (*glass fiber reinforce polymer*). GFRP adalah salah satu jenis komposit yang memiliki sifat-sifat sebagai berikut (Palanikumar dkk., 2012): kekuatan tarik tinggi, modulus elastisitas tinggi, ringan, tahan terhadap korosi. Material GFRP banyak digunakan pada bagian pesawat seperti *body fairing*, pintu ruang penyimpanan barang, dan pintu roda pesawat. *Body fairing* pada pesawat menggunakan material GFRP-*stainless steel stacks* yang bertujuan untuk mengurangi keausan material badan pesawat. Pada bagian tersebut terjadi gesekan antara bagian *wing flap* dengan bagian badan pesawat pada saat pesawat akan tinggal landas dan mendarat.

Salah satu proses manufaktur yang dilakukan pada bagian *body fairing* pesawat adalah proses gurdi. Proses gurdi merupakan proses pembuatan lubang



silindris pada benda kerja untuk proses perakitan komponen yang satu dengan komponen lainnya. Pembuatan lubang termasuk salah satu proses paling penting di bidang manufaktur (Kalpakjian, 2009). Jumlah lubang yang dibutuhkan untuk perakitan pesawat terbang bervariasi mulai dari 300.000 lubang pada pesawat tempur hingga 1,5-3 juta lubang pada pesawat komersial (Mouritz, 2012). Proses perakitan komponen pesawat umumnya dilakukan dengan menggunakan baut dan keling. Lubang yang tidak sesuai dengan spesifikasi akan menyebabkan kegagalan pada sambungan. Untuk menghasilkan lubang yang sesuai dengan spesifikasi, dibutuhkan pemilihan parameter proses yang tepat dengan melakukan optimasi terhadap karakteristik kualitas yang kritis pada lubang.

Kinerja dari proses gudi pada material komposit dapat dievaluasi berdasarkan beberapa karakteristik kualitas seperti kekasaran permukaan lubang dan delaminasi. Pada penggudian material *stainless steel* terdapat beberapa masalah seperti kebulatan lubang, keausan pahat gudi, ketinggian bur (*burr height*), dan kekasaran permukaan. Selain itu, gaya tekan dan momen torsi juga digunakan untuk mengevaluasi proses gudi (Nagaraja dkk., 2013). Kesalahan pemilihan parameter proses pemesian merupakan penyebab dari timbulnya masalah tersebut (Vankanti dan Ganta, 2013). Oleh karena itu, ukuran-ukuran kinerja tersebut dapat digunakan untuk melakukan evaluasi terhadap kinerja dari proses gudi. Pada proses pemesian secara umum, ukuran-ukuran kinerja tersebut dijadikan sebagai respon yang merupakan fungsi dari parameter proses atau faktor. Khusus pada proses gudi, faktor yang mempengaruhi karakteristik kualitas ataupun ukuran-ukuran kinerja adalah kecepatan potong, gerak makan, geometri dan sudut ujung pahat (*point angle*).

Parameter proses pemesian biasanya dipilih berdasarkan material benda kerja, material pahat dan geometri pahat. Optimasi kondisi pemesian akan meningkatkan kualitas produk dan produktifitas kerja. Penentuan kombinasi parameter proses pemesian dengan menggunakan optimasi secara serentak dari beberapa respon cukup sulit dilakukan, karena harus melakukan rangkaian percobaan yang berjumlah besar dan kompleks. Metode yang dapat digunakan untuk melakukan optimasi multirespon pada proses pemesian adalah metode BPNN yang dipadu dengan metode GA. BPNN telah menjadi metode yang sangat



ampuh dan praktis untuk model persamaan *non-linear* dan GA banyak digunakan dalam berbagai bidang penelitian untuk optimasi parameter. Aplikasi BPNN yang dipadu dengan GA digunakan untuk meningkatkan hasil optimasi respon yang bersifat kontinyu (Tzeng dkk., 2013).

Penelitian yang membahas peramalan respon dengan menggunakan metode BPNN dilakukan pada proses gurdi (Hayajneh, 2011). Penelitian tersebut menggunakan material *metal matrix composite* (MMC) dengan persentase aluminium dan tembaga yang berbeda. Pada penelitian ini, respon yang diamati adalah momen torsi dan gaya tekan. Parameter proses yang divariasikan adalah kecepatan spindel dan kecepatan makan. Hasil penelitian menunjukkan persentase eror antara hasil eksperimen dan hasil prediksi adalah 2,03% untuk momen torsi dan 3,46% untuk gaya tekan.

Studi tentang pengoptimasian parameter proses pada proses freis menggunakan metode BPNN-GA (Razfar dkk., 2009). Parameter proses yang divariasikan adalah kecepatan spindel, kecepatan makan dan kedalaman pemakanan masing masing memiliki 3 level dan alur pahat *end mill* memiliki 2 level. Rancangan percobaan yang digunakan pada penelitian ini adalah *full factorial design* (FFD) sebanyak 54 percobaan. Jaringan BPNN yang digunakan pada penelitian ini adalah 4-5-5-2. Kekasaran permukaan dan delaminasi merupakan respon yang diamati. Hasil penelitian menunjukkan bahwa BPNN-GA dapat memberikan seting parameter proses untuk menghasilkan respon yang optimal. Persentase eror antara hasil prediksi BPNN-GA dan hasil eksperimen sebesar 1,28% untuk nilai kekasaran permukaan dan 4,02% untuk delaminasi.

Penelitian lainnya yang membahas tentang optimasi parameter proses pada proses *electrical discharge machining* (EDM) menggunakan metode BPNN-GA dan *respon surface methodology* (RSM) (Tzeng dkk., 2013). Parameter proses yang divariasikan adalah *pulse off time*, *arc off time*, *servo voltage*, *wire feed rate*, *wire tension*, *water pressure* yang masing-masing memiliki tiga level dan *pulse on time* memiliki dua level. Rancangan percobaan yang digunakan adalah Taguchi L₁₈. Jaringan BPNN yang digunakan adalah 7-4-2. Respon yang diamati adalah *material removal rate* (MRR) dan kekasaran permukaan (R_a). Hasil penelitian



menunjukkan bahwa respon optimal yang dihasilkan oleh BPNN-GA lebih baik dibandingkan dengan metode RSM.

Berdasarkan hal-hal yang telah dipaparkan, akan dilakukan penelitian tentang penentuan pengaturan parameter proses yaitu kecepatan spindel, kecepatan makan dan sudut ujung pahat pada proses gurdi untuk material komposit GFRP-*stainless steel stacks* yang digunakan pada *body fairing* pesawat. Penelitian dilakukan agar dapat menghasilkan respon gaya tekan, momen torsi, kekasaran permukaan lubang dan delaminasi yang minimal. Rancangan percobaan menggunakan faktorial $3 \times 3 \times 3$ dengan replikasi sebanyak 3 kali. Metode optimasi multi respon yang digunakan adalah *backpropagation neural network* (BPNN) dan *genetic algorithm* (GA).

1.2 Rumusan Masalah

Adapun rumusan permasalahan berdasarkan latar belakang yang telah dijelaskan adalah sebagai berikut:

1. Bagaimana arsitektur jaringan BPNN yang tepat untuk memprediksi gaya tekan, momen torsi, kekasaran permukaan lubang dan delaminasi pada proses pemesinan gurdi material GFRP-*stainless steel stacks* dengan parameter-parameter proses yaitu kecepatan spindel, kecepatan makan dan sudut ujung pahat.
2. Bagaimana kombinasi yang tepat dari kecepatan spindel, kecepatan makan dan sudut ujung pahat pada penggurdian material GFRP-*stainless steel stacks*, agar dapat meminimalkan gaya tekan, momen torsi, kekasaran permukaan lubang dan delaminasi.

1.2.1 Batasan Masalah

Batasan masalah yang diberlakukan supaya penelitian dapat berjalan secara fokus dan terarah, serta dapat mencapai tujuan yang diinginkan adalah sebagai berikut:

1. Tidak membahas proses pembuatan material.
2. Tidak membahas getaran pada saat proses penggurdian.
3. Proses penggurdian dengan menggunakan mesin freis CNC Brother TC-22A.



4. Tidak membahas sistem kontrol dan pemrograman CNC yang digunakan pada proses penggurdian.
5. Material pahat gurdi yang digunakan adalah karbida diameter 8 mm.
6. Pahat gurdi memiliki 2 alur.
7. Material yang digunakan adalah GFRP-*stainless steel stacks* dengan tebal *stainless steel* = 1,2 mm, dan tebal GFRP = 4 mm.
8. Proses penggurdian tidak menggunakan cairan pendingin.

1.2.2 Asumsi Penelitian

Asumsi-asumsi penelitian yang diberlakukan pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Parameter yang tidak diteliti dianggap selalu konstan dan tidak berpengaruh secara signifikan terhadap hasil penelitian.
2. Tidak terdapat interaksi yang signifikan antara parameter yang diteliti.
3. Sifat mekanik dan komposisi kimia dari material yang digunakan adalah homogen.
4. Mesin dan operator bekerja dalam kondisi baik selama proses pemesinan.
5. Alat ukur yang digunakan dalam keadaan layak dan terkalibrasi.
6. Kondisi benda kerja tidak bergerak (tetap) selama proses penggurdian.

1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan penelitian berdasarkan perumusan masalah adalah sebagai berikut:

1. Membuat arsitektur jaringan BPNN untuk memprediksi respon pada proses gurdi material GFRP-*stainless steel stacks* berdasarkan parameter proses mesin gurdi yaitu kecepatan spindel, kecepatan makan dan sudut ujung pahat.
2. Menentukan seting yang tepat dari parameter proses tersebut agar diperoleh gaya tekan, momen torsi, kekasaran permukaan lubang dan delaminasi minimal.



1.4 Manfaat Penelitian

Manfaat yang dapat diperoleh melalui penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Memberikan manfaat terutama kepada operator pemmesinan di dunia industri mengenai seting parameter proses yang tepat khususnya pada proses penggurdian material GFRP-*stainless steel stacks*, sehingga diharapkan respon gaya tekan, momen torsi, kekasaran permukaan lubang, dan delaminasi seminimal mungkin dapat tercapai.
2. Sebagai bahan referensi bagi penelitian sejenisnya dalam rangka pengembangan pengetahuan tentang optimasi gaya tekan, momen torsi, kekasaran permukaan lubang, dan delaminasi pada proses penggurdian material GFRP-*stainless steel stacks*.
3. Menyempurnakan penelitian-penelitian terdahulu yang mengangkat masalah tentang optimasi gaya tekan, momen torsi, kekasaran permukaan lubang, dan delaminasi pada proses gurdi.

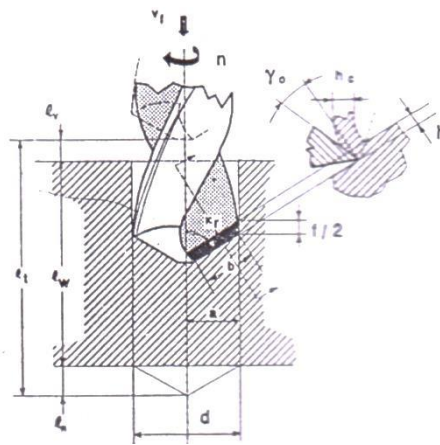


BAB 2

DASAR TEORI

2.1 Proses Pemesinan Gurdi

Proses gurdi (*drilling*) adalah proses pembuatan lubang silindris pada benda kerja dengan menggunakan pahat gurdi seperti ditunjukkan pada Gambar 2.1. Pada proses ini, pahat gurdi berputar dan menekan kebawah untuk melakukan proses pemotongan benda kerja. Pada proses pemotongan terjadi gerak relatif dan persinggungan antara pahat dan benda kerja yang menghasilkan geram.



Gambar 2.1 Proses Menggurdi (Rochim, 1993)

Elemen-elemen dasar proses gurdi meliputi (Rochim, 1993):

A. Pahat

- a. Kecepatan potong

$$v = \frac{\pi \cdot d \cdot n}{1000} \quad (\text{m/menit}) \quad (2.1)$$

- b. Gerak makan per mata potong

$$f_z = \frac{v_f}{n \cdot z} \quad (\text{mm/putaran}) \quad (2.2)$$

- c. Kedalaman potong

$$a = \frac{d}{2} \quad (\text{mm}) \quad (2.3)$$

- d. Kecepatan penghasilan geram

$$Z = \frac{\pi \cdot d^2 \cdot v_f}{4 \cdot 1000} \quad (\text{cm}^3/\text{menit}) \quad (2.4)$$

Dengan:

d = diameter pahat potong

z = jumlah mata potong



V_f = kecepatan makan

K_r = sudut potong utama

B. Benda kerja

$$L_t = L_v + L_w + L_n \text{ (mm)} \quad (2.5)$$

Dengan:

L_t = panjang total langkah penggurdian (mm)

L_v = panjang langkah awal penggurdian (mm)

L_w = panjang penggurdian benda kerja (mm)

L_n = panjang langkah akhir penggurdian (mm)

$$L_n \geq \frac{(d/2)}{\tan K_r} \text{ (mm)} \quad (2.6)$$

C. Mesin perkakas gurdi

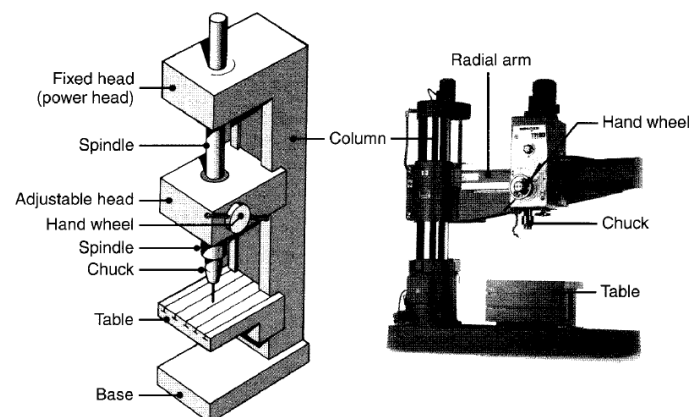
a. Putaran poros utama mesin

$$n = \frac{1000 \cdot v}{\pi \cdot d} \text{ (putaran/menit)} \quad (2.7)$$

b. Waktu pemotongan

$$t_c = \frac{L_t}{V_f} \text{ (menit)} \quad (2.8)$$

Salah satu contoh struktur mesin gurdi ditunjukkan pada Gambar 2.2.



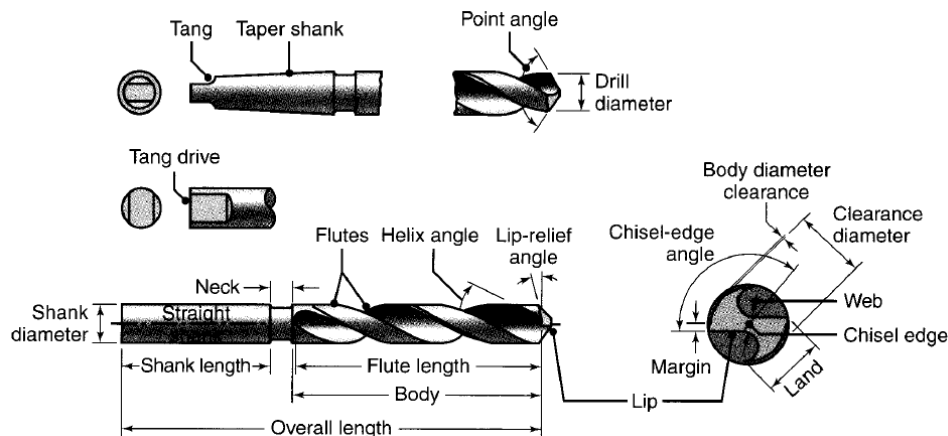
Gambar 2.2 Mesin Gurdi (Kalpakjian dan Schmid, 2009)

2.1.1 Geometri Pahat

Pahat gurdi merupakan sebuah pahat pemotong yang ujungnya berputar dan memiliki sisi potong dan jalur di sepanjang badan pahat gurdi. Jalur dapat berbentuk lurus atau *helix*, yang disediakan untuk memungkinkan lewatnya



geram dan cairan pendingin. Pada proses gurdi terdapat berbagai macam tipe pahat yang bisa digunakan. Tipe pahat yang dipakai tergantung dari lubang yang akan dibuat. Sebagian besar dari proses gurdi dilakukan dengan menggunakan pahat gurdi berjenis *twist drill*. Nama-nama bagian pahat ditunjukkan pada Gambar 2.3. Di antara bagian-bagian pahat tersebut yang paling utama adalah sudut *helix* (*helix angle*), sudut potong utama (*point angle*) dan sudut bebas (*clearance angle*).



Gambar 2.3 Geometri Pahat Gurdi (*Twist Drill*) (Kalpakjian dan Schmid, 2009)

Bagian-bagian utama dari *twist drill* adalah badan pahat, *point* (bagian dari ujung yang runcing) dan tangkai. *Twist drill* dapat diklasifikasikan menurut materialnya, jenis tangkainya, ukuran diameter dan geometri pahatnya.

Berdasarkan jenis tangkainya, *twist drill* dapat diklasifikasikan sebagai berikut:

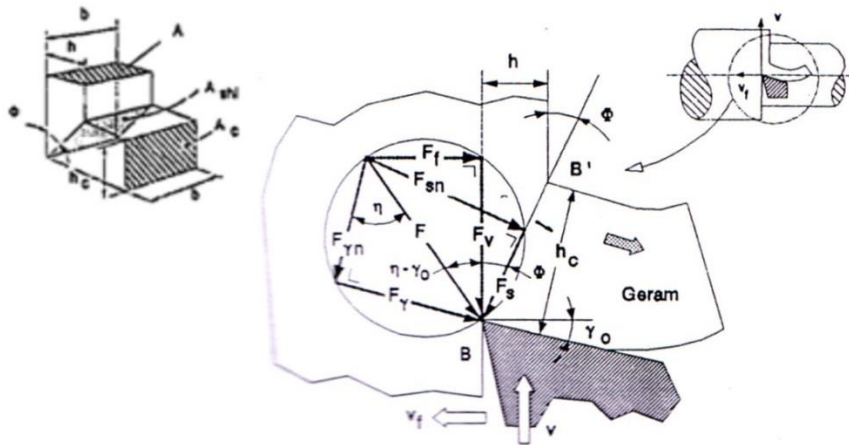
1. *Straight shank drill*: jenis pahat ini mempunyai tangkai berbentuk silinder.
2. *Taper shank drill*: jenis pahat ini mempunyai tangkai berbentuk konis, yang sesuai untuk dipasang langsung pada spindel mesin.

2.1.2 Gaya Pemotongan pada Proses Gurdi

Gaya Pemotongan pada proses gurdi dianggap sebagai akibat dari timbulnya konsentrasi tegangan yang disebabkan oleh gaya tekan dari mata potong pahat. Tegangan pada benda kerja tersebut mempunyai orientasi yang kompleks dan pada salah satu arah akan menimbulkan tegangan yang maksimum. Apabila tegangan geser tersebut melebihi kekuatan bahan benda



kerja, maka akan terjadi deformasi plastis pada daerah tegangan yang dirambatkan oleh gerakan pahat. Deformasi plastis ini menggeser dan memutuskan material benda kerja diujung pahat pada suatu bidang geser, sehingga terbentuk geram (Rochim, 1993). Gambar 2.4 menunjukkan pembentukan geram akibat tegangan geser yang dilakukan pahat terhadap benda kerja yang diambil dari lingkaran Merchant.



Gambar 2.4 Lingkaran Gaya Pemotongan (Lingkaran Merchant) (Rochim, 1993)

Gaya potong adalah gaya yang menimbulkan tegangan geser yang menghasilkan deformasi plastis pada bidang geser. Pada perhitungan teoritik, diasumsikan bahwa deformasi material benda kerja dalam proses pemotongan terjadi dalam dua dimensi dan tegangan terdistribusi secara merata pada bidang geser. Berdasarkan analisis geometrik dari lingkaran gaya pemotongan seperti ditunjukkan oleh Gambar 2.4. Persamaan dari gaya potong teoritik F_v adalah (Rochim, 1993):

$$F_v = \frac{F_s \cdot \cos(\eta - \gamma_0)}{\cos(\phi + \eta - \gamma_0)} \quad (\text{N}) \quad (2.9)$$

Dengan:

$$F_v = F \cos(\eta - \gamma_0) \quad (2.10)$$

$$F_s = F \cos(\phi + \eta - \gamma_0) \quad (2.11)$$

γ_0 = sudut geram

η = sudut gesek

ϕ = sudut geser



F adalah gaya total dan F_s adalah gaya geser yang mendeformasikan material pada bidang geser sehingga melampaui batas elastik. F_s dapat ditentukan dengan menggunakan penampang bidang geser dan tegangan geser yang terjadi, yaitu (Rochim, 1993):

$$F_s = A_{shi} \cdot \tau_{shi} \text{ (N)} \quad (2.12)$$

Dengan:

$$A_{shi} = A / \sin \phi = \text{penampang bidang geser (mm}^2\text{)} \quad (2.13)$$

Luas pemotongan adalah:

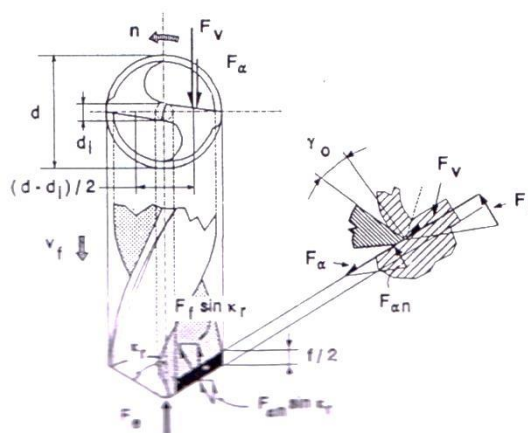
$$A = \frac{d-d_i}{2} \cdot \frac{f}{2} \text{ (mm}^2\text{)} \quad (2.14)$$

Dengan demikian gaya potong dapat dirumuskan sebagai:

$$F_v = \tau_{shi} \cdot A \cdot \frac{\cos(\eta-\gamma_0)}{\sin \phi \cos(\phi+(\eta-\gamma_0))} \text{ (N)} \quad (2.15)$$

$$F_v = \tau_{shi} \cdot b \cdot h \cdot \frac{f}{2} \cdot \frac{\cos(\eta-\gamma_0)}{\sin \phi \cos(\phi+(\eta-\gamma_0))} \text{ (N)} \quad (2.16)$$

Pada proses gurdi yang menggunakan pahat dengan dua mata potong, gaya pemotongan pada salah satu mata potong dapat diuraikan menjadi dua komponen, yaitu F_v dan F_f seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.5. F_f adalah gaya makan yang searah dengan kecepatan makan. Penekanan yang terjadi pada proses gurdi berfungsi untuk melawan gaya ekstruksi yang cukup besar diujung pahat gurdi (karena kecepatan potong diujung pahat gurdi sama dengan nol, maka tidak terjadi pemotongan melainkan penekanan atau ekstruksi benda kerja), serta untuk melawan gesekan pada bidang utama atau mayor bagi kedua mata potong.



Gambar 2.5 Gaya Pemotongan pada Proses Gurdi (Rochim, 1993)



Berdasarkan Gambar 2.5, dapat diturunkan persamaan gaya tangensial, yaitu:

$$F_t = F_v + F_\alpha \text{ (N)} \quad (2.17)$$

F_α adalah gaya gesek pada bidang utama, yang tergantung pada gaya gesek spesifik persatuan panjang aktif mata potong (k_f (N/mm)). Gaya gesek ini dipengaruhi oleh geometri pahat, benda kerja, cairan pendingin dan kondisi pemotongan. Persamaan gaya gesek adalah:

$$F_\alpha = K_f \cdot \frac{d-d_i}{2 \sin K_r} \text{ (N)} \quad (2.18)$$

Substitusi persamaan 2.16 dan persamaan 2.17 kedalam persamaan 2.18 menghasilkan persamaan gaya tangensial berikut ini:

$$F_t = \tau_{shi} \cdot \frac{d-d_i}{2} \cdot \frac{f}{2} \cdot \frac{\cos(\eta-\gamma_0)}{\sin \phi \cos(\phi+\eta-\gamma_0)} + K_f \cdot \frac{d-d_i}{2 \sin K_r} \text{ (N)} \quad (2.19)$$

Dengan:

τ_{shi} = tegangan geser pada bidang geser (N/mm²)

γ_0 = sudut geram

η = sudut gesek

ϕ = sudut geser

Momen torsi yang diperlukan agar pahat potong dapat berputar adalah:

$$M_z = F_t \cdot \frac{d-d_i}{2} \text{ (Nmm)} \quad (2.20)$$

Gaya tekan yang diperlukan agar proses pemakanan dapat berlangsung adalah:

$$F_z = 2 F_f \sin K_r + 2 F_{an} \sin K_r + F_e \text{ (N)} \quad (2.21)$$

Dengan:

F_z = gaya tekan total untuk dua sisi potong (N)

F_f = gaya makan (N)

$$F_f = F_v \tan (\eta - \gamma_0) \quad (2.22)$$

F_{an} = gaya normal pada bidang utama potong, yang tergantung pada gaya normal spesifik persatuan panjang aktif mata potong (K_n (N/mm)), dan dipengaruhi oleh jenis geometri pahat, benda kerja, cairan pendingin dan kondisi pemotongan.



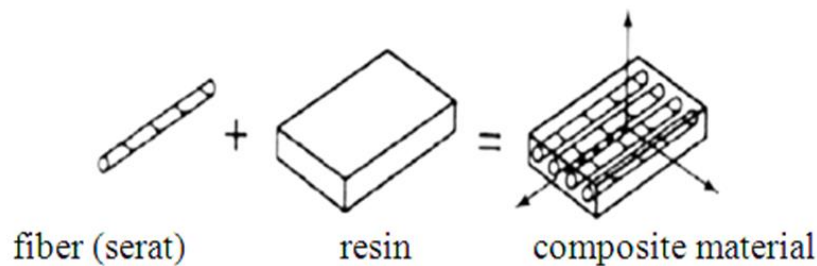
F_e = gaya ekstruksi yang terjadi di ujung pahat potong. Sesuai dengan penampang diameter inti d_i dari hasil percobaan, secara umum gaya ini bernilai sekitar 50% sampai 55% dari gaya tekan total (N).

Dengan demikian persamaan gaya total adalah:

$$F_z = 4 \{ F_v \tan(\eta - \gamma_0) \sin K_r + K_n(d - d_i)/2 \} (N) \quad (2.23)$$

2.2 Material Komposit

Material komposit merupakan material yang terdiri dari dua atau lebih bahan yang berbeda yang digabung atau dicampur secara makroskopis menjadi suatu bahan yang berguna (Jones, 1975). Komposit adalah bahan hibrida yang terbuat dari resin polimer diperkuat dengan serat, menggabungkan sifat-sifat mekanik dan fisik. Ilustrasi ikatan dan sifat fisik polimer dapat dilihat pada Gambar 2.6.



Gambar 2.6 Komposisi Material Komposit

Bahan komposit merupakan bahan gabungan secara makro yang didefinisikan sebagai suatu sistem material yang tersusun dari campuran atau kombinasi dua atau lebih unsur-unsur utama yang secara makro berbeda dalam bentuk dan atau komposisi material yang tidak dapat dipisahkan (Schwartz, 1984).

Material komposit mempunyai beberapa keuntungan diantaranya:

1. Bobotnya ringan.
2. Mempunyai kekuatan dan kekakuan yang baik.
3. Biaya produksi murah.
4. Tahan korosi.

Material komposit terdiri dari dua buah penyusun, yaitu *filler* (bahan pengisi) dan matriks. Adapun definisi dari keduanya adalah sebagai berikut:



1. *Filler* adalah bahan pengisi yang digunakan dalam pembuatan komposit, biasanya berupa serat atau serbuk. Serat yang sering digunakan dalam pembuatan komposit antara lain serat E-glass, boron, karbon dan lain sebagainya. Bisa juga dari serat alam antara lain serat kenaf, jute, rami, cantula dan lain sebagainya.
2. Matriks adalah fasa dalam komposit yang mempunyai bagian atau fraksi volume terbesar (dominan). Matriks dalam struktur komposit bisa berasal dari bahan polimer, logam, maupun keramik. Matriks secara umum berfungsi untuk mengikat serat menjadi satu struktur komposit. Fungsi dari matriks dalam komposit antara lain:
 - a. Mengikat serat menjadi satu kesatuan struktur.
 - b. Melindungi serat dari kerusakan akibat kondisi lingkungan.
 - c. Mentransfer dan mendistribusikan beban ke serat.
 - d. Menyumbangkan beberapa sifat seperti, kekakuan, ketangguhan dan tahanan listrik.

Tujuan dibuatnya komposit yaitu memperbaiki sifat mekanik atau sifat spesifik tertentu, mempermudah desain yang sulit pada manufaktur, keleluasaan dalam bentuk atau desain yang dapat menghemat biaya produksi, dan menjadikan bahan lebih ringan. Komposit yang diproduksi oleh suatu instansi atau pabrik biasanya dapat diprediksi sifat mekanik dari bahan komposit berdasarkan bahan matriks dan bahan penguatnya (Callister, 2007). Adapun beberapa sifat mekanik yang dapat diprediksi dari komposit yaitu kekuatan tarik dan kelayakan sebagai material komposit (validitas komposit).

Dalam komposit, kekuatan tarik dipengaruhi oleh kekuatan *interface*-nya. Dari pengujian kekuatan *interface* sangat sulit ditentukan karena prosesnya yang tidak sederhana, sehingga hasil pengujian juga sangat sulit ditentukan karena adanya faktor teknis pembuatan spesimen. Untuk komposit polimer/serat, perbedaan campuran unsur matriks dan perbedaan serat juga menghasilkan kekuatan *adhesive* yang berbeda sehingga tidak jarang serat akan putus sebelum terlepas dari matriksnya. Secara keseluruhan sifat komposit ini dipengaruhi oleh (Callister, 2007):



1. Sifat dari serat/penguat
2. Sifat dari matriks penyusun komposit
3. Fraksi volume serat dan matriks penyusun
4. Orientasi serat pada komposit tersebut

2.2.1 Klasifikasi Material Komposit

Berdasarkan matriks yang digunakan, komposit dapat dikelompokkan atas (Callister, 2007):

1. *Ceramic matrix composite* (CMC)

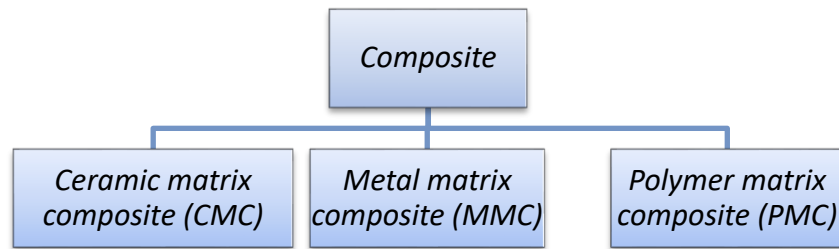
CMC merupakan material dua fasa dengan satu fasa berfungsi sebagai penguat dan satu fasa sebagai matriks, dimana matriksnya terbuat dari keramik. Penguat yang umum digunakan pada CMC adalah oksida, karbida dan nitrida.

2. *Metal matrix composite* (MMC)

MMC adalah salah satu jenis komposit yang memiliki matriks logam. Pada mulanya yang diteliti adalah *continous filamen* MMC yang digunakan dalam industri penerbangan.

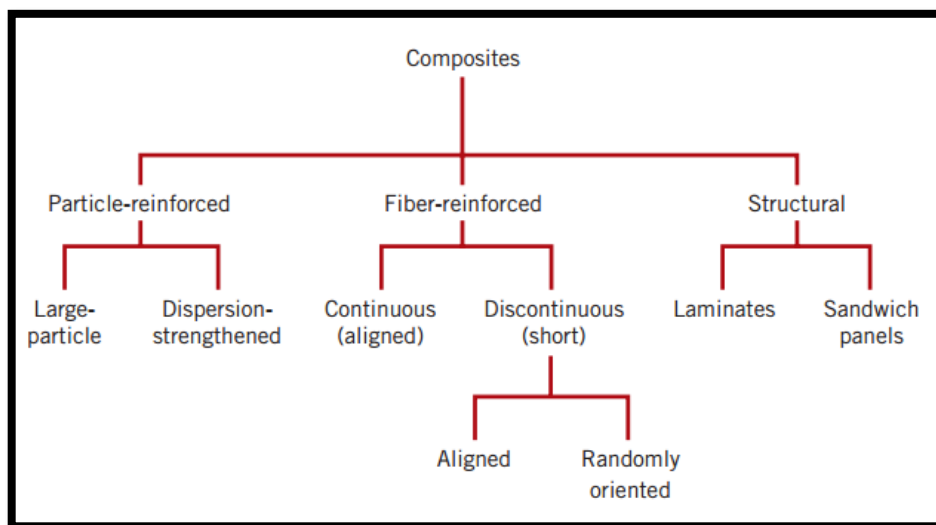
3. *Polymer matrix composite* (PMC)

PMC merupakan matriks yang paling umum digunakan pada material komposit karena memiliki sifat yang lebih tahan terhadap korosi dan lebih ringan. Matriks polimer terbagi menjadi dua, yaitu termoset dan termoplastik. Perbedaannya, polimer termoset tidak dapat didaur ulang sedangkan termoplastik dapat didaur ulang sehingga lebih banyak digunakan. Jenis-jenis termoplastik yang biasa digunakan adalah *polypropylene* (PP), *polystyrene* (PS), *polyethylene* (PE) dan lain-lain. Gambar 2.7 menunjukkan bagan pengelompokan komposit berdasarkan matriks yang digunakan (Callister, 2007).



Gambar 2.7 Klasifikasi Komposit Berdasarkan Matriksnya
Berdasarkan strukturnya komposit dibedakan atas (Callister, 2007):

1. *Particulate composite materials* (komposit partikel)
Merupakan *jenis* komposit yang menggunakan partikel/butiran sebagai *filler* (pengisi). Partikel berupa logam atau non logam dapat digunakan sebagai *filler*.
2. *Fiber composite materials* (komposit serat)
Komposit yang terdiri dari dua komponen penyusun yaitu matriks dan serat.
3. *Structural composite materials* (komposit berlapis)
Komposit yang terdiri dari sekurang-kurangnya dua material berbeda yang direkatkan bersama-sama. Proses pelapisan dilakukan dengan mengkombinasikan aspek terbaik dari masing-masing lapisan untuk memperoleh bahan yang berguna. Untuk lebih jelasnya, pembagian komposit berdasarkan strukturnya dapat dilihat pada Gambar 2.8.



Gambar 2.8 Klasifikasi Komposit Berdasarkan Strukturnya (Callister, 2007)



2.2.2 Fiber Reinforced Composite Material

Material komposit yang dibahas dalam penelitian ini adalah jenis *fiber reinforced* yaitu komposit yang terdiri dari serat-serat sebagai penguat yang diikat dengan matriks. Tujuan dibuatnya material ini adalah agar material memiliki kekuatan dan modulus spesifik yang tinggi (Callister, 2007). Bahan serat yang sering digunakan sebagai penguat adalah gelas, aramid dan karbon (*graphite*).

Material dalam bentuk serat mempunyai kekuatan yang lebih tinggi dibandingkan material dalam bentuk *bulk* karena serat mempunyai ukuran yang mendekati ukuran kristal, sehingga dislokasi yang ada lebih kecil dibandingkan dislokasi pada material dalam bentuk *bulk*. Matriks yang digunakan sebagai pengikat serat juga dapat berfungsi untuk mengalirkan tegangan dari satu serat ke serat lainnya, selain itu juga untuk meneruskan tegangan pada serat yang putus. Material matriks memiliki kekuatan yang lebih rendah dibandingkan material serat, karena fungsi utamanya hanya sebagai pengikat serat.

2.2.3 Polymer Matrix Composite

Polymer matrix composite (PMC) mengandung polimer resin sebagai matriks dengan serat sebagai penguat. Material ini banyak digunakan di berbagai aplikasi komposit karena beberapa kelebihan, yaitu biaya pembuatan lebih rendah, dapat dibuat dengan produksi massal, polimer memiliki sifat-sifat antara lain ketangguhan yang baik, ketahanan simpan yang baik, siklus fabrikasi yang dapat dipersingkat, kemampuan mengikuti bentuk dan lebih ringan dibandingkan dengan jenis matriks yang lain. Jenis polimer yang banyak digunakan adalah (Callister, 2007):

1. Termoplastik

Termoplastik adalah plastik yang dapat dilunakkan berulang kali (*recycle*) dengan menggunakan panas. Termoplastik merupakan polimer yang akan menjadi keras apabila didinginkan. Termoplastik meleleh pada suhu tertentu, melekat mengikuti perubahan suhu dan mempunyai sifat dapat balik (*reversibel*) kepada sifat aslinya yaitu kembali mengeras bila didinginkan.



2. Termoset

Termoset tidak dapat mengikuti perubahan suhu. Bila sekali pengerasan telah terjadi, maka bahan tidak dapat dilunakkan kembali. Pemanasan yang tinggi tidak akan melunakkan termoset, melainkan akan membentuk arang dan terurai. Plastik jenis termoset tidak begitu baik dalam proses daur ulang karena selain sulit penanganannya, volumenya juga jauh lebih sedikit (sekitar 10%) dari volume jenis plastik yang bersifat termoset. Beberapa klasifikasi PMC berdasarkan jenis penguatnya antara lain (Callister, 2007):

1. *Glass fiber reinforced polymer (GFRP) composites*
2. *Carbon fiber reinforced polymer (CFRP) composites*
3. *Aramid fiber reinforced polymer composites*

Ketiga jenis fiber diatas merupakan jenis fiber yang paling sering digunakan sebagai penguat pada material komposit dengan matriks polimer. Selain ketiga jenis fiber diatas beberapa jenis fiber juga digunakan antara lain boron, karbida silikon dan oksida aluminium.

2.2.4 *Multi Directional Aramid/Epoxy*

Material serat yang telah diikat dengan matriks membentuk lamina. Arah serat dapat satu arah (*uni directional*) dapat pula dalam banyak arah (*multi directional*). Lamina satu arah memiliki kekuatan yang tinggi dalam arah seratnya, sedangkan lamina dengan serat banyak arah (*multi directional*) memiliki kekuatan yang tinggi dalam arah serat yang mempunyai kekuatan yang lebih tinggi (Callister, 2007). Lamina-lamina yang disusun bertumpuk akan membentuk laminat. Sudut orientasi tiap lamina diatur sedemikian rupa sehingga laminat yang dihasilkan memiliki kekuatan seperti yang diinginkan.

2.3 **Baja Tahan Karat (*Stainless Steel*)**

Baja tahan karat atau *stainless steel* (SS) adalah paduan baja dengan kandungan kromium minimal 10,5%. Kemampuan tahan karat diperoleh dari terbentuknya lapisan film oksida kromium. Unsur-unsur lain ditambahkan untuk



memperbaiki sifat-sifatnya antara lain ditambahkan nikel, tembaga, titanium, aluminium, silikon, niobium, nitrogen, sulfur dan selenium.

2.3.1 Klasifikasi dan Komposisi *Stainless Steel*

Klasifikasi *stainless steel* didasarkan pada struktur metalurginya yaitu (McGuire, 2008):

1. Austenitik *stainless steel*

Austenitik *stainless steel* memiliki mikrostruktur *face centre cubic* (FCC). Penambahan 8% nikel pada material ini mencegah transformasi austenit ke martensit saat pendinginan, sehingga austenit lebih stabil walaupun pada suhu kamar. Austenitik SS banyak digunakan secara luas dalam bidang kedokteran gigi khususnya ortodonti karena sifatnya yang tahan korosi. Tipe AISI 304 L SS dan 303 banyak digunakan sebagai bahan dasar braket ortodonti dengan komposisi 18-20% kromium, 8-10% nikel, sedikit mangan, silikon dan karbon 0,003%. AISI 303 adalah tipe austenitik SS pertama yang merupakan campuran 18% kromium dan 8% nikel dan sedikit selenium. Sedangkan tipe 316L SS memiliki kandungan nikel lebih tinggi 2-3% molybdenum dan karbon yang lebih rendah untuk menambah resistensi terhadap korosi intergranular. Tipe AISI 302 dengan komposisi 17-19% kromium, 8-10% nikel dan 0,08% karbon biasanya digunakan untuk kawat ortodonti.

2. Ferritik *stainless steel*

Material jenis ini adalah tipe AISI 400 dengan sifat ketahanan korosi yang cukup baik walaupun tidak sebaik austenitik SS disebabkan kandungan kromium yang lebih rendah. Komposisi kromium 11,5-27%, karbon 0,20% dan tanpa nikel. Pada perubahan temperatur, jenis material ini tidak menimbulkan perubahan fase ke keadaan padat, maka logam ini tidak mengeras dengan pemanasan. Walaupun banyak digunakan dalam bidang industri, tetapi material ini jarang digunakan dalam bidang kedokteran gigi.

3. Martensitik *stainless steel*

Sama halnya dengan jenis ferritik *stainless steel*, jenis martensitik juga dikategorikan tipe AISI 400. Akan tetapi sifat martensitik berbeda dengan tipe ferritik, tipe martensitik dapat dikeraskan dengan cara dipanaskan (*heat*



treatment) sehingga memiliki sifat kekerasan yang baik tetapi ketahanan korosi paling rendah dibandingkan dengan tipe austenitik dan ferritik SS. Komposisinya mengandung kromium 12-14%, molybdenum 0,2-1%, nikel 0-2% dan karbon 0,1-1%.

4. *Precipitation hardening stainless steel*

Precipitation hardening (PH) *stainless steel* adalah kombinasi optimal dari sifat-sifat martensitik dan austenitik yaitu lebih kuat dan ketahanan korosi yang baik. Kekuatan (*tensile strength*) yang tinggi disebabkan oleh proses *heat treatment* yang menghasilkan endapan salah satu atau lebih copper, aluminium, titanium, niobium dan molybdenum yang memang ditambahkan ke dalam *stainless steel*. Material ini digunakan bila diperlukan kombinasi kekuatan tinggi dan resistensi korosi. Salah satu pemakaian *precipitation hardening stainless steel* yang paling dikenal adalah untuk kepala pemukul stik golf.

5. *Duplex stainless steel*

Duplex stainless steel memiliki bentuk mikrostruktur campuran austenitik dan ferritik. Kombinasi dari kedua tipe tersebut menghasilkan kekuatan dua kali lipat lebih baik daripada austenitik dan tidak mudah fraktur dibandingkan dengan ferritik *stainless steel*. Selain itu, sifat tahan korosi dalam mulut terutama korosi karena gaya tekan (*stress corrosion cracking*) lebih baik daripada austenitik *stainless steel*. Komposisinya mengandung kromium yang tinggi 18-30%, molybdenum yang tinggi 0,1-4,5% dan nikel lebih rendah 1,3-6%, tembaga dan besi. Nitrogen ditambahkan untuk menambah kekuatan dan ketahanan terhadap korosi. Tipe 2304 dan 2205 *duplex stainless steel* digunakan sebagai bahan dasar braket ortodonti dan indikasi untuk pasien yang alergi nikel.

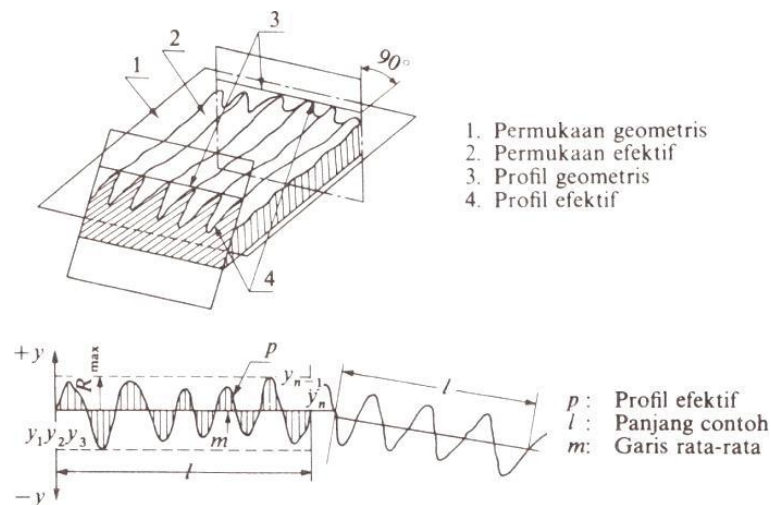
2.4 Kekasaran Permukaan Benda Kerja

Kekasaran permukaan merupakan salah satu karakteristik yang sangat penting dalam bidang manufaktur maupun dalam perancangan komponen mesin. Kekasaran permukaan didefinisikan sebagai ketidakaturan konfigurasi permukaan pada suatu benda atau bidang. Penyimpangan rata-rata aritmatika (R_a) merupakan



jumlah rata-rata puncak tertinggi dan terendah dari setiap gelombang yang diukur pada panjang tertentu.

Penyimpangan rata-rata aritmatika (R_a) sebagai harga rata-rata dari ordinat-ordinat profil efektif garis rata-ratanya. Profil efektif merupakan garis bentuk dari potongan permukaan efektif oleh sebuah bidang yang telah ditentukan secara konvensional terhadap permukaan geometris ideal. Ilustrasi yang lebih jelas terhadap permukaan geometris, permukaan efektif, profil geometris, dan profil efektif ditunjukkan oleh Gambar 2.9 (Juhana dan Suratman, 2000).



Gambar 2.9 Parameter Kekasaran Permukaan (Juhana dan Suratman, 2000)

Harga R_a ditentukan dari nilai-nilai ordinat ($y_1, y_2, y_3, \dots, y_n$) yang dijumlahkan tanpa memperhitungkan tandanya. Secara umum, R_a dirumuskan sebagai berikut:

$$R_a = \frac{1}{l} \int_0^l |y| dx \quad (2.24)$$

Harga R_a tersebut dapat didekati dengan persamaan:

$$R_a = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_i| \quad (2.25)$$

Atau

$$R_a = \frac{y_1 + y_2 + y_3 + \dots + y_n}{n} \quad (2.26)$$

Dengan:

R_a = Nilai kekasaran aritmatika

y_n = Tinggi atau dalam bagian-bagian profil hasil pengukuran jarum peraba



n = Frekuensi pengukuran

l = Panjang sampel yang telah ditentukan, yaitu panjang dari profil efektif yang diperlukan untuk menentukan kekasaran permukaan dari permukaan yang diteliti

Nilai penyimpangan rata-rata aritmatika telah diklasifikasikan oleh ISO (*International Organization for Standardization*) menjadi 12 tingkat kekasaran. Tingkat kekasaran ini dilambangkan dari N1 hingga N12 seperti yang ditunjukkan oleh Tabel 2.1 (Rochim, 2001).

Tabel 2.1 Nilai Kekasaran dan Tingkat Kekasaran

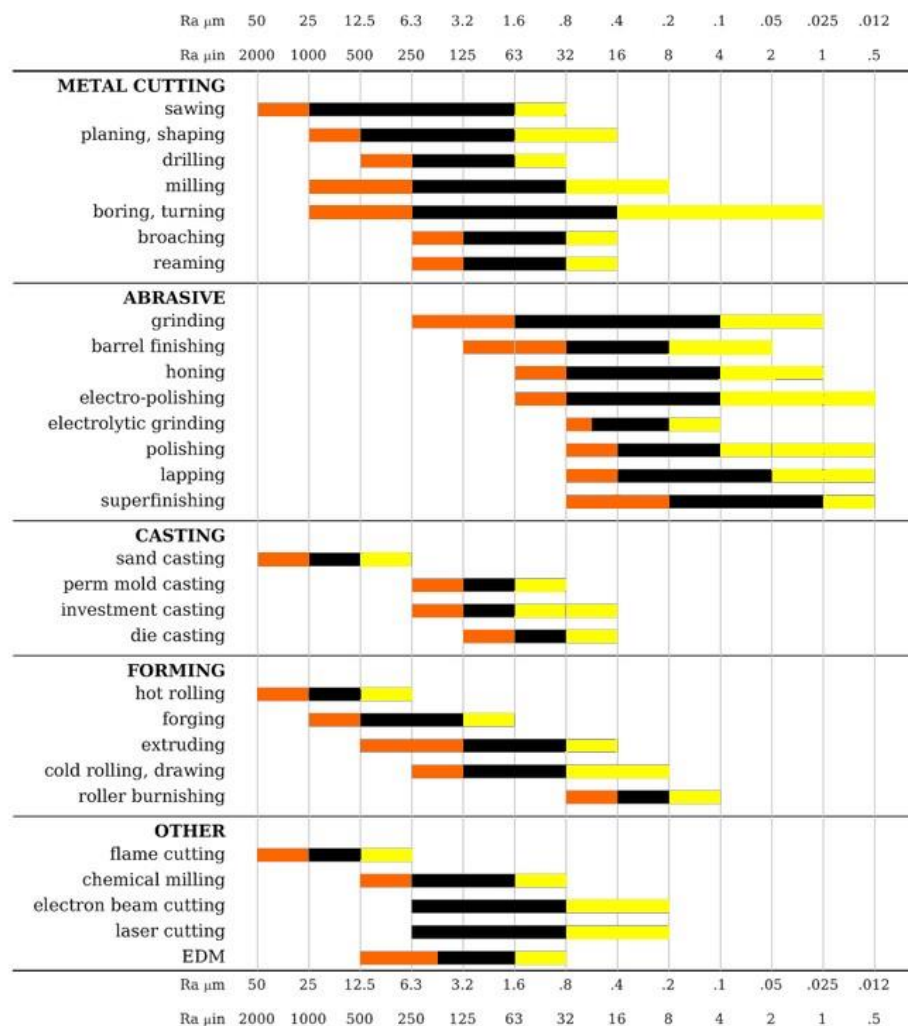
Harga Kekasaran, R_a (μm)	Angka Kelas Kekasaran	Panjang Sampel (mm)
50	N 12	8
25	N 11	
12,5	N 10	2,5
6,3	N 9	
3,2	N 8	0,8
1,6	N 7	
0,8	N 6	
0,4	N 5	
0,2	N 4	0,25
0,1	N 3	
0,05	N 2	
0,025	N 1	0,08

R_a merupakan parameter respon yang paling banyak digunakan untuk mengidentifikasi kekasaran permukaan. Penggunaan parameter R_a sebenarnya tidak mempunyai dasar yang kuat untuk mengidentifikasi ketidakrataan konfigurasi permukaan karena beberapa profil permukaan dapat menghasilkan nilai R_a yang hampir sama. Akan tetapi, parameter R_a cocok digunakan untuk memeriksa kualitas permukaan akhir benda kerja yang dihasilkan dalam jumlah banyak. Parameter R_a lebih peka terhadap penyimpangan yang terjadi pada proses



pemesinan bila dibandingkan dengan parameter-parameter kekasaran permukaan yang lain. Dengan demikian pencegahan akan dapat dilakukan jika muncul tanda-tanda penambahan angka kekasaran permukaan benda kerja. Beberapa nilai contoh kekasaran yang dapat dicapai dengan beberapa cara pengerjaan diperlihatkan oleh Tabel 2.2 (http://wikipedia.org/wiki/surface_finish).

Tabel 2.2 Nilai Kekasaran yang Dicapai oleh Beberapa Pengerjaan



Keterangan: kasar normal halus

Keterangan:

Kasar = Nilai kekasaran permukaan yang dicapai dengan pengerjaan kasar.



Normal = Nilai kekasaran permukaan yang dicapai dengan pengerjaan normal.

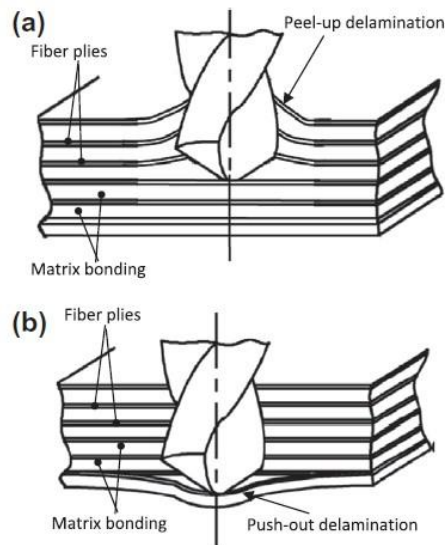
Halus = Nilai kekasaran permukaan yang dicapai dengan pengerjaan khusus.

2.5 Delaminasi

Delaminasi adalah terkelupasnya lapisan tipis pada permukaan benda kerja dan merupakan salah satu jenis kerusakan pada material komposit yang timbul pada sisi masuk (*peel up delamination*) maupun sisi keluar (*push out delamination*) saat penggurdian. Pada umumnya, delaminasi dikenal sebagai sifat kegagalan matriks yang dominan pada komposit yang berlapis-lapis (*laminate*). Faktor-faktor yang menyebabkan terjadinya delaminasi adalah adanya pembebanan yang berulang-ulang pada benda kerja, tegangan interlaminar yang tinggi pada sudut-sudutnya dan konsentrasi tegangan pada lokasi retak atau kerusakan lain pada laminat.

Peel up delamination terjadi di sekitar sisi masuk/permukaan atas lubang hasil penggurdian seperti ditunjukkan Gambar 2.10 a). Ketika tepi potong pahat menyentuh lapisan komposit, menghasilkan gaya kupas yang memisahkan lapisan satu dengan lapisan yang lain melalui kemiringan *flute* pahat sehingga membentuk zona delaminasi di sekitar sisi masuk lubang.

Push out delamination terjadi di sekitar sisi keluar/permukaan bawah lubang hasil penggurdian seperti ditunjukkan Gambar 2.10 b). Ketika pahat mendekati sisi keluar lubang, lapisan di bawah pahat yang belum terpotong menjadi lebih rentan terhadap deformasi akibat ketebalannya menurun, pada saat lapisan yang belum terpotong dibebani gaya tekan yang melebihi kekuatan ikatan antar lapisan, maka timbul *push out delamination* di sisi keluar lubang penggurdian.

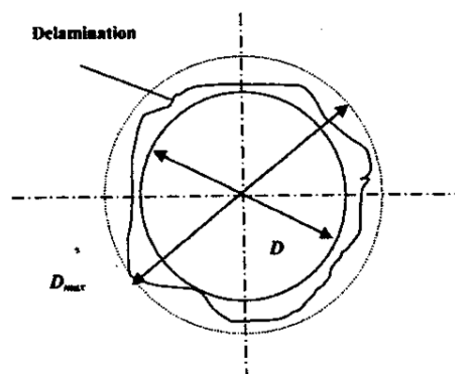


Gambar 2.10 Skema Delaminasi pada Komposit Laminat. a). *Peel Up Delamination*. b). *Push Out Delamination* (Liu dkk., 2012)

Metode yang digunakan untuk mengukur besarnya delaminasi pada hasil penggurdian komposit yang sering digunakan yaitu dengan mencari faktor delaminasi (F_d) (Gaitonde dkk., 2007):

$$F_d = \frac{D_{max}}{D_{nom}} \quad (2.27)$$

D_{max} dan D_{nom} merupakan diameter maksimum pada delaminasi yang diamati dan diameter lubang nominal yang ditunjukkan pada Gambar 2.11.



Gambar 2.11 Ilustrasi dari Skema Pengukuran Faktor Delaminasi (Gaitonde dkk., 2007)



2.6 Jaringan Syaraf Tiruan (*Artificial Neural Network*)

Artificial neural network (ANN) adalah sistem pemroses informasi yang memiliki karakteristik mirip dengan jaringan syaraf biologi (Siang, 2009). Pada tahun 1940 an ilmuwan menemukan bahwa psikologi otak sama dengan cara kerja komputer. Pemrograman komputer dibuat sesuai dengan cara kerja dari otak manusia ini yang disebut sebagai ANN, namun sampai sekarang ini belum ada yang dapat menyamai kemampuan otak manusia. Pemodelan dengan ANN ini telah digunakan secara luas dalam berbagai bidang. Alasan dipilihnya metode ANN ini adalah dapat menyelesaikan fungsi dengan parameter *input* dan *output* yang lebih kompleks. Sedangkan dengan menggunakan program *excel* hanya mampu menyelesaikan satu *input* dan satu *output* saja.

- Program *excel*, dengan satu *input* dan satu *output* yang mempunyai fungsi sebagai berikut:

$$y = f(x) \quad (2.28)$$

- ANN, misalkan parameter *input* a, b, c, dan d, parameter *output* x dan y, maka fungsinya menjadi:

$$(xy) = f(a, b, c, d) \quad (2.29)$$

Bila persamaan 2.29 ini diselesaikan menggunakan *excel*, maka hasilnya akan sulit dihasilkan. Oleh karena itu, ANN adalah metode yang tepat untuk menyelesaikan permasalahan ini.

ANN ini juga mempunyai kelebihan dimana bisa mengatasi beberapa persoalan tanpa mengadakan perubahan drastis terhadap modelnya, dan waktu penyelesaian yang cepat. Kelebihannya yang lain adalah metode ini tidak perlu adanya asumsi bahwa data harus berdistribusi normal serta metode ini juga mempunyai ketelitian yang cukup tinggi. Namun, pemodelan dengan ANN ini juga mempunyai kelemahan dalam ekstrapolasi. Kelemahan ini dapat diatasi dengan mengambil lebih banyak contoh data pada tempat di mana ekstrapolasi terjadi (Cheng, 2012).

Ada beberapa model jaringan arsitektur yang sering digunakan dalam ANN, misalnya jaringan model *hebb*, *perceptron*, *adaline* dan *backpropagation*. *Backpropagation neural network* (BPNN) dibentuk dengan membuat generalisasi aturan pelatihan dalam model *widrow-hoff* dengan cara menambahkan layer



tersembunyi. Kata *backpropagation* merujuk pada cara bagaimana gradien perubahan bobot dihitung (Siang, 2009).

BPNN terdiri dari *input layer*, *hidden layer* dan *output layer*, dimana masing-masing *layer* memiliki sejumlah *neuron* yang saling terhubung antar *layer* dan memiliki bobot. Hasil *output* BPNN didasarkan pada pengalaman saat melakukan proses pelatihan (*training*). Proses pelatihan BPNN diawali dengan memberikan nilai bobot awal. Informasi yang sudah diketahui hasilnya dimasukkan ke dalam *neuron* pada *input layer*. Bobot-bobot ini digunakan untuk mengingat pola informasi yang telah diberikan. Pengaturan bobot diatur secara terus menerus sampai diperoleh hasil yang diharapkan. Tujuan pelatihan BPNN adalah untuk mencapai kemampuan memanggil kembali secara sempurna sebuah pola yang telah dipelajari dan menghasilkan nilai *output* yang bisa diterima terhadap pola-pola yang serupa yang disebut sebagai generalisasi.

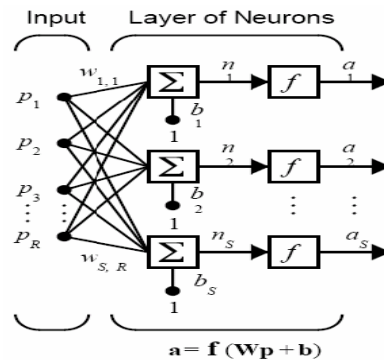
Kinerja pelatihan BPNN akan dipengaruhi oleh penentuan jaringan arsitektur BPNN dan algoritma pembelajaran. Tidak ada teori yang dengan pasti dapat dipakai. Tetapi secara praktis dicoba jaringan arsitektur yang kecil terlebih dahulu misal terdiri dari 1 layar tersembunyi. Jika kesalahan tidak turun dalam *epoch* yang besar, maka jaringan diperbesar dengan menambahkan unit tersembunyi atau bahkan menambah layar tersembunyi (Siang, 2009).

2.6.1 Arsitektur Jaringan

Neuron-neuron dalam jaringan syaraf membentuk suatu struktur tertentu. Dalam ANN, arsitektur yang umum dipakai dibedakan menjadi dua, yaitu jaringan layar tunggal (*single layer network*) dan jaringan layar jamak (*multi layer network*).

a. Jaringan layar tunggal.

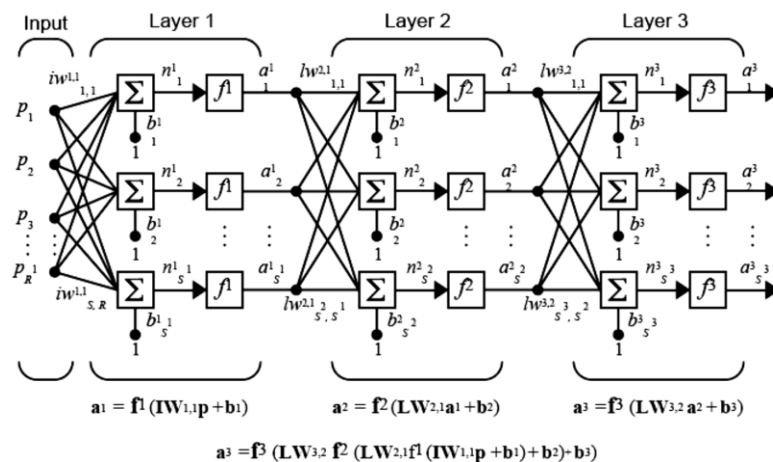
Dalam jaringan ini, sekumpulan *input neuron* dihubungkan langsung dengan sekumpulan *output*. Gambar 2.12 menunjukkan arsitektur jaringan tunggal. Pada jaringan ini, semua unit *input* dihubungkan langsung dengan semua *output*, meskipun dengan bobot yang berbeda. Pada jaringan ini tidak ada unit *input* yang dihubungkan dengan unit *input* lainnya.



Gambar 2.12 Jaringan Layer Tunggal

b. Jaringan layer jamak.

Jaringan layer banyak merupakan perkembangan dari jaringan layer tunggal. Dalam jaringan ini, selain *input* unit dan *output* unit, ada unit lain yang sering disebut layer tersembunyi. Jaringan layer jamak dapat menyelesaikan masalah lebih kompleks dibanding jaringan layer tunggal, meskipun dibutuhkan waktu yang lebih lama. Gambar 2.13 menunjukkan arsitektur jaringan jamak.



Gambar 2.13 Jaringan Layer Jamak

2.6.2 Fungsi Aktivasi

Fungsi aktivasi yang dipakai pada BPNN harus memenuhi beberapa syarat yaitu kontinyu, terdiferensial dengan mudah, dan merupakan fungsi yang tidak turun. Salah satu fungsi yang memenuhi ketiga syarat tersebut sehingga sering dipakai adalah fungsi *sigmoid biner* yang memiliki interval 0 sampai 1. Fungsi *sigmoid biner* adalah sebagai berikut (Siang, 2009):



$$f(x) = \frac{1}{1+e^{-x}} \quad (2.30)$$

dengan turunan

$$f'(x) = f(x)(1 - f(x)) \quad (2.31)$$

Selain fungsi *sigmoid biner*, juga sering digunakan fungsi *sigmoid bipolar* yang bentuk fungsinya mirip dengan fungsi *sigmoid biner*. Namun fungsi *sigmoid bipolar* memiliki interval -1 sampai 1. Fungsi *sigmoid bipolar* adalah sebagai berikut:

$$f(x) = \frac{2}{1+e^{-2x}} - 1 \quad (2.32)$$

dengan turunan

$$f'(x) = \frac{(1+f(x))(1-f(x))}{2} \quad (2.33)$$

Nilai maksimum yang dimiliki fungsi *sigmoid* adalah satu. Untuk pola yang targetnya lebih besar dari satu, pola masukan dan keluaran harus terlebih dahulu ditransformasi sehingga polanya memiliki interval yang sama seperti fungsi *sigmoid* yang digunakan. Alternatif lain dengan menggunakan fungsi aktivasi *sigmoid* hanya pada layar keluaran, yang lazimnya digunakan fungsi identitas yaitu $f(x) = x$.

2.6.3 Pelatihan Standar BPNN

Pelatihan BPNN dilakukan untuk melatih jaringan yang digunakan. Tujuannya adalah untuk meminimumkan kesalahan rata-rata atau *mean square error* (MSE). Pelatihan BPNN meliputi 3 fase (Siang, 2009). Fase pertama adalah fase maju. Pola masukan dihitung maju mulai dari layar masukan hingga layar keluaran dengan menggunakan fungsi aktivasi yang ditentukan. Fase kedua adalah fase mundur. Selisih antara keluaran jaringan dengan target yang diinginkan merupakan kesalahan yang terjadi. Kesalahan tersebut dipropagasikan mundur, dimulai dari garis yang berhubungan langsung dengan unit-unit di layar keluaran. Fase ketiga adalah modifikasi bobot untuk menurunkan kesalahan yang terjadi.

- Fase I: propagasi maju

Selama propagasi maju, sinyal masukan (x_i) dipropagasikan ke lapis tersembunyi dengan menggunakan fungsi aktivasi yang ditentukan. Keluaran dari setiap unit lapis tersembunyi (z_j) tersebut selanjutnya dipropagasikan



maju lagi ke lapis tersembunyi di atasnya dengan menggunakan fungsi aktivasi yang ditentukan. Demikian seterusnya hingga menghasilkan keluaran jaringan (y_k). Berikutnya, keluaran jaringan (y_k) dibandingkan dengan target yang harus dicapai (t_k). Selisih $t_k - y_k$ adalah kesalahan yang terjadi. Jika kesalahan ini lebih kecil dari batas toleransi yang ditentukan, maka iterasi dihentikan. Akan tetapi apabila kesalahan masih lebih besar dari batas toleransinya, maka bobot setiap garis dalam jaringan akan dimodifikasikan untuk mengurangi kesalahan yang terjadi.

- Fase II: propagasi mundur

Berdasarkan kesalahan $t_k - y_k$, dihitung faktor δ_k ($k = 1, 2, \dots, m$) yang dipakai untuk mendistribusikan kesalahan di unit y_k ke semua unit tersembunyi yang terhubung langsung dengan y_k . δ_k juga dipakai untuk mengubah bobot garis yang menghubungkan langsung dengan unit keluaran. Dengan cara yang sama, dihitung δ_j di setiap unit di lapis tersembunyi sebagai dasar perubahan bobot semua garis yang berasal dari unit tersembunyi di lapis dibawahnya. Demikian seterusnya hingga faktor δ di unit tersembunyi yang berhubungan langsung dengan unit masukan dihitung.

- Fase III: perubahan bobot

Setelah semua faktor δ dihitung, bobot semua garis dimodifikasi bersamaan. Perubahan bobot suatu garis didasarkan atas faktor δ *neuron* di lapis atasnya. Sebagai contoh, perubahan bobot garis yang menuju ke lapis keluaran didasarkan atas dasar δ_k yang ada di unit keluaran. Ketiga fase tersebut diulang-ulang terus hingga kondisi penghentian dipenuhi. Umumnya kondisi penghentian yang sering dipakai adalah jumlah iterasi atau kesalahan. Iterasi akan dihentikan jika jumlah iterasi yang dilakukan sudah melebihi jumlah maksimum iterasi yang ditetapkan, atau jika kesalahan yang terjadi sudah lebih kecil dari batas toleransi yang diijinkan.

2.6.4 Arsitektur BPNN

Masalah utama yang dihadapi dalam BPNN adalah lamanya iterasi yang harus dilakukan. BPNN tidak dapat memberikan kepastian tentang berapa *epoch* yang harus dilalui untuk mencapai kondisi yang diinginkan.



a. Pemilihan bobot dan bias awal

Pemilihan inisialisasi bobot akan mempengaruhi apakah jaringan mencapai galat pada minimum global atau lokal. Perubahan bobot antara kedua unit tergantung pada kedua turunan fungsi aktivasi unit di atas dan unit di bawahnya. Hal penting yang harus dihindari adalah pemilihan bobot awal yang akan membuat fungsi aktivasi atau turunannya menjadi nol. Jika bobot awal terlalu besar, masukan awal ke tiap unit tersembunyi atau keluaran akan berada pada daerah di mana turunan fungsi *sigmoid* memiliki nilai sangat kecil (disebut daerah jenuh). Sebaliknya jika bobot terlalu kecil sinyal masukan pada unit tersembunyi atau keluaran akan mendekati nol yang menyebabkan pelatihan jaringan akan sangat lambat. Prosedur umum adalah menginisialisasi bobot dengan nilai acak antara -0,5 dan 0,5 (atau -1 dan 1) atau pada rentang nilai yang lain yang sesuai. Nilai bisa positif atau negatif, karena bobot pada akhir pelatihan juga memiliki kedua tanda tersebut.

b. Jumlah unit tersembunyi

Hasil teoritis yang didapat menunjukkan bahwa jaringan dengan sebuah lapis tersembunyi sudah cukup bagi BPNN untuk mengenali kesesuaian antara masukan dan target dengan tingkat ketelitian yang ditentukan. Akan tetapi penambahan jumlah layer tersembunyi kadangkala membuat pelatihan lebih mudah. Semakin banyak layer tersembunyi yang digunakan, maka jaringan akan mampu menangani jangkauan statistik yang lebih luas dan tinggi. Jumlah lapisan yang terlalu banyak bisa menyebabkan laju konvergensi menjadi lebih lambat. Hal ini disebabkan sinyal galat berkurang secara numerik jika melewati terlalu banyak lapisan dan lapisan tambahan cenderung menciptakan minimum lokal.

c. Jumlah pola pelatihan

Tidak ada kepastian tentang berapa banyak pola yang diperlukan agar jaringan dapat dilatih dengan sempurna. Jumlah pola yang dibutuhkan dipengaruhi oleh banyaknya bobot dalam jaringan serta tingkat akurasi yang diharapkan. Umumnya data yang digunakan untuk *training* adalah 70%, 15 % untuk validasi dan 15 % untuk *testing*.



d. Parameter laju pembelajaran

Parameter laju pembelajaran (*learning rate*) sangat berpengaruh pada proses pelatihan. Begitu pula terhadap efektivitas dan kecepatan mencapai konvergensi dari pelatihan. Nilai optimum dari *learning rate* tergantung permasalahan yang diselesaikan, prinsipnya dipilih sedemikian rupa sehingga tercapai konvergensi yang optimal dalam proses pelatihan. Nilai *learning rate* yang cukup kecil menjamin penurunan gradient terlaksana dengan baik, namun ini berakibat bertambahnya jumlah iterasi. Pada umumnya besarnya nilai laju pembelajaran tersebut dipilih mulai 0,001 sampai 1 selama proses pelatihan.

e. Momentum

Disamping koefisien laju pembelajaran, ada koefisien lain yang bertujuan untuk mempercepat konvergensi dari algoritma *error* BPNN. Penggunaan koefisien momentum ini disarankan apabila konvergensi berlangsung terlalu lama, dan juga untuk mencegah terjadinya lokal minimum. Dengan penambahan momentum, bobot baru pada waktu ke $t+1$ didasarkan atas bobot pada waktu t dan $t-1$.

2.6.5 Preprocessing data eksperimen

Preprocessing data eksperimen digunakan untuk normalisasi data eksperimen yang memiliki satuan dan interval yang berbeda-beda menjadi data yang non-dimensional dengan interval diantara $[-1, 1]$. Rumus untuk melakukan *preprocessing* data eksperimen adalah sebagai berikut (Yin, 2011):

$$p_n = \frac{2(p - \min(p))}{(\max(p) - \min(p))} - 1 \quad (2.34)$$

Dengan:

p = data parameter *input* dan respon dari eksperimen

p_n = data hasil normalisasi parameter *input* dan respon eksperimen



2.6.6 Perhitungan hasil peramalan dengan BPNN

Perhitungan nilai persen *error* dari selisih data eksperimen dengan hasil peramalan BPNN adalah sebagai berikut (Rong, 2015):

$$Error = \frac{Eksp - BPNN}{Eksp} \times 100\% \quad (2.35)$$

Dengan:

Eksp = nilai parameter respon dari eksperimen

BPNN = nilai hasil peramalan BPNN

Perhitungan nilai *mean square error* (MSE) dari data eksperimen dengan hasil peramalan BPNN adalah sebagai berikut (Tzeng, 2013):

$$MSE = \frac{1}{n} \sum_i^n (x_i - \bar{x})^2 \quad (2.36)$$

Dengan:

x_i = hasil peramalan BPNN

\bar{x} = nilai rata-rata hasil peramalan BPNN

2.7 Optimasi Proses dengan Metode *Genetic Algorithm* (GA)

Penentuan nilai optimasi dari suatu persamaan dapat dilakukan dengan berbagai metode. Metode optimasi yang dapat digunakan adalah secara analitis dan numerik, yang diuraikan sebagai berikut (Napitupulu, 2011):

- Secara analitis

Penentuan optimasi dilakukan dengan cara mendefinisikan persamaan tersebut. Contoh penggunaan metode analitis adalah pada suatu persamaan dengan satu variabel, misalnya x yang mempunyai fungsi seperti berikut:

$$f(x) = x^2 - 2x + 1 \quad (2.37)$$

Dalam metode analitis, untuk menemukan titik minimum x pada fungsi diatas adalah dengan menganggap bahwa gradient dari $f(x)$ sama dengan nol.

$$f'(x) = 0$$

$$0 = 2x - 2 \quad (2.38)$$



dan didapatkan hasil dari persamaan tersebut, yaitu $x = 1$. Hasil dari x disubstitusikan pada deferensial kedua dari persamaan untuk mengetahui dengan pasti nilai minimumnya.

$$\begin{aligned} f''(x) &= 2 \\ 2 &> 0 \end{aligned} \quad (2.39)$$

- Secara numerik

Optimasi secara numerik dilakukan dengan cara iterasi. Langkah pertama adalah menentukan nilai awal yang digunakan dalam iterasi. Kemudian menerapkannya pada persamaan tersebut. Iterasi akan berhenti jika:

$$\begin{aligned} f(x^{k+1}) - f(x^k) &< \varepsilon_1 \text{ atau} \\ f'(x^k) &< \varepsilon_2 \end{aligned} \quad (2.40)$$

dimana k adalah jumlah iterasi dan ε adalah nilai batas toleransi atau kriteria ketelitian yang ditentukan. Salah satu metode perhitungan secara numerik adalah metode Newton. Pada metode ini diferensiasi pertama maupun kedua dari persamaan dibutuhkan dalam perhitungan, dimana perhitungan didasarkan pada persamaan berikut ini:

$$x^{k+1} = x^k - \frac{f'(x^k)}{f''(x^k)} \quad (2.41)$$

Sebagai contoh apabila pada persamaan (2.37) dihitung dengan menggunakan metode Newton, maka sebagai langkah awal ditentukan nilai x awal pada iterasi pertama.

Iterasi 1:

Nilai awal: $x^1 = 3$

$$x^2 = x^1 - \frac{f'(x^1)}{f''(x^1)}$$

$$x^2 = x^1 - \frac{2x - 2}{2}$$

$$x^2 = 3 - \frac{2(3) - 2}{2}$$

$$x^2 = 1 \text{ sehingga, } x^2 \neq x^1$$

Iterasi 2:

Nilai awal: $x^2 = 1$



$$x^3 = x^2 - \frac{f'(x^2)}{f''(x^2)}$$

$$x^3 = x^2 - \frac{2x - 2}{2}$$

$$x^3 = 1 - \frac{2(1) - 2}{2}$$

$$x^3 = 1 \text{ sehingga, } x^3 = x^2$$

Dengan menggunakan metode numerik ini, nilai minimum didapatkan pada iterasi yang kedua.

Kelemahan dari metode analitis, jika persamaan $f(x)$ adalah persamaan yang lebih kompleks, maka dibutuhkan beberapa tahapan untuk perhitungan. Selain itu, jika variabel yang digunakan lebih dari satu (x_1 , x_2 , dan seterusnya), metode analitis sulit digunakan. Dengan demikian, metode numerik lebih efektif digunakan dibandingkan dengan metode analitis untuk persamaan-persamaan yang kompleks, karena tahapan perhitungan dapat diminimalisir. Namun kelemahan pada metode numerik, khususnya metode newton adalah dibutuhkan diferensiasi pada persamaan. Jika data yang didapat sangatlah kompleks, maka metode diferensial akan sulit untuk digunakan, karena barangkali hanya diperoleh titik optimum lokal saja bukan titik optimum yang global. GA merupakan metode yang dinilai efektif untuk menyelesaikan masalah dengan data-data yang kompleks.

Secara umum, GA adalah metode untuk menyelesaikan masalah optimasi berdasarkan prinsip bertahan dalam evolusi. Hal ini dapat dilakukan dengan menciptakan sebuah populasi yang terdiri dari individu-individu dimana setiap individu mempresentasikan kromosom seperti yang terdapat pada *deoxyribo nucleic acid* (DNA) manusia. Individu-individu pada populasi tersebut kemudian mengalami proses evolusi. GA adalah salah satu teknik pencari secara acak yang sangat strategis, dimana dapat bertahan untuk menemukan penyelesaian yang optimal atau mendekati optimal pada persamaan *non-linier* yang kompleks.

Tahapan-tahapan GA untuk menentukan titik optimum adalah sebagai berikut (Santosa, 2011):



1. Bangkitkan populasi awal.

Populasi awal atau kromosom-kromosom awal dibangkitkan secara random. Evaluasi nilai setiap individu didalam populasi awal ini dengan menggunakan *fitness function*. Tentukan ukuran populasi, probabilitas kawin silang, probabilitas mutasi.

2. Pilih individu terbaik untuk disalin sejumlah tertentu untuk mengganti individu lain.
3. Lakukan seleksi kompetitif untuk memilih anggota populasi sebagai induk untuk dikawin silang.
4. Lakukan kawin silang antar induk yang dipilih.
5. Tentukan beberapa individu dalam populasi untuk mengalami proses mutasi.
6. Jika belum mencapai konvergensi, kembali ke langkah dua.
7. Menghentikan algoritma apabila kriteria telah terpenuhi.

Perhitungan untuk menentukan optimasi dengan GA dapat dilakukan dengan menggunakan perangkat lunak Matlab. GA memanipulasi populasi untuk memperoleh kondisi optimum. Dalam setiap langkah, GA menyeleksi secara acak dari populasi yang ada untuk menentukan yang akan menjadi orang tua dan menggunakannya untuk menghasilkan keturunan (*offspring*) pada generasi berikutnya. Pada setiap generasi, kesesuaian orang tua atau individu dalam populasi dievaluasi. Beberapa individu dipilih dari populasi mereka berdasarkan dari kesesuaian mereka dalam fungsi *fitness* dan diubah (direkomendasikan dan mungkin bermutasi secara acak) untuk membentuk suatu populasi baru. Populasi baru itu kemudian digunakan untuk iterasi selanjutnya dalam algoritma. Biasanya, algoritma akan berhenti ketika jumlah maksimum dari generasi telah dihasilkan atau tingkat kesesuaian yang telah ditentukan terpenuhi untuk populasi tersebut. Langkah utama untuk menciptakan generasi berikutnya dari populasi adalah sebagai berikut (Basuki, 2003):

- a. Seleksi

Memilih individu, yang disebut dengan orang tua, yang akan menghasilkan populasi di generasi berikutnya. Proses seleksi akan menentukan individu-



individu mana saja yang akan dipilih untuk dilakukan rekombinasi dan bagaimana individu baru (*offspring*) terbentuk dari individu-individu terpilih tersebut. Metode seleksi dalam pemilihan individu dapat dilakukan dengan cara-cara sebagai berikut:

1. *Roulette wheel selection (RWS)*

Roulette Wheel Selection merupakan metode penseleksian individu secara *probabilistic* berdasarkan performansi tiap individu. Seleksi RWS dilakukan seperti pembuatan piringan *roulette* yang memiliki *slot-slot*.

2. *Stochastic universal sampling (SUS)*

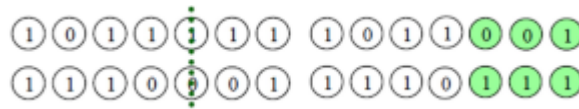
Mirip seperti *Roulette Wheel Selection*, *Stochastic Universal Sampling* dengan menggunakan N buah *pointer* dengan spasi sama pada segmen garis tempat probabilitas individu diseleksi dipetakan, dimana N adalah jumlah individu terseleksi yang diharapkan.

b. Proses pindah silang (*crossover*)

Prinsip dari pindah silang adalah melakukan operasi pada gen-gen yang bersesuaian dari induk yang terpilih untuk menghasilkan individu yang baru. Proses *crossover* dilakukan pada setiap individu secara acak dengan probabilitas *crossover* yang sudah ditentukan. Operator *crossover* bergantung pada representasi kromosom yang dilakukan. Ada dua model *crossover* dengan representasi kromosom, yaitu dengan satu titik dan lebih dari satu titik (Basuki, 2003).

(a) *Crossover* satu titik

Crossover satu titik biasanya dipakai untuk representasi kromosom dalam biner dan posisi *crossover* k ($k = 1, 2, \dots, N-1$), dengan N adalah panjang kromosom yang diseleksi secara random. Variabel-variabel ditukar antar kromosom pada titik tersebut untuk menghasilkan keturunan baru (*offspring*). Model *crossover* satu titik dapat diilustrasikan pada Gambar 2.14.



Gambar

2.14 Model *Crossover* Satu Titik

(b) *Crossover* banyak titik

Model *crossover* banyak titik, posisi *crossover* k_i ($k = 1, 2, \dots, N-1$, $i = 1, 2, \dots, m$), dengan N adalah panjang kromosom yang diseleksi secara random dan posisi tidak dibolehkan ada yang sama, serta diurutkan naik. Variabel-variabel ditukar antar kromosom pada titik tersebut untuk menghasilkan keturunan baru (*offspring*). Model *crossover* dua titik dan banyak titik dapat diilustrasikan pada Gambar 2.15 dan Gambar 2.16.



Gambar 2.15 Model *Crossover* Dua Titik



Gambar 2.16 Model *Crossover* Banyak Titik

c. Proses mutasi (*mutation*)

Operator genetika berikutnya adalah mutasi gen. Operator ini berguna untuk menggantikan gen yang hilang dari populasi akibat proses seleksi. Kromosom anak dimutasi dengan cara menambahkan nilai random yang sangat kecil dengan probabilitas yang rendah. Peluang mutasi (P_m) didefinisikan sebagai persentase dari jumlah total gen pada populasi yang mengalami proses mutasi. Peluang mutasi mengendalikan banyaknya gen baru yang nanti dimunculkan untuk dievaluasi. Apabila peluang mutasi terlalu kecil dapat mengakibatkan banyak gen yang mungkin berguna tidak pernah dievaluasi. Jika peluang mutasi terlalu besar dapat mengakibatkan terlalu banyak gangguan acak, sehingga keturunan baru yang dihasilkan akan kehilangan



kemiripan dari induknya dan dapat juga menghilangkan kemampuan algoritma untuk belajar dari histori pencarian.

2.8 Eksperimen Konfirmasi

Eksperimen konfirmasi merupakan langkah terakhir yang harus dilakukan pada penelitian tentang optimasi proses. Eksperimen ini dilaksanakan dengan melakukan percobaan yang menggunakan kombinasi level faktor-faktor hasil optimasi. Tujuan eksperimen konfirmasi adalah untuk melakukan validasi terhadap kesimpulan yang diambil pada tahap analisis, serta untuk mencocokkan hasil prediksi dengan hasil secara aktual (Ross, 1996).

Langkah-langkah dalam eksperimen konfirmasi dapat dijabarkan sebagai berikut:

- a. Melakukan percobaan berdasarkan kombinasi untuk respon optimum.
- b. Membandingkan rata-rata hasil percobaan konfirmasi dengan nilai hasil prediksi.



[Halaman ini sengaja dikosongkan]

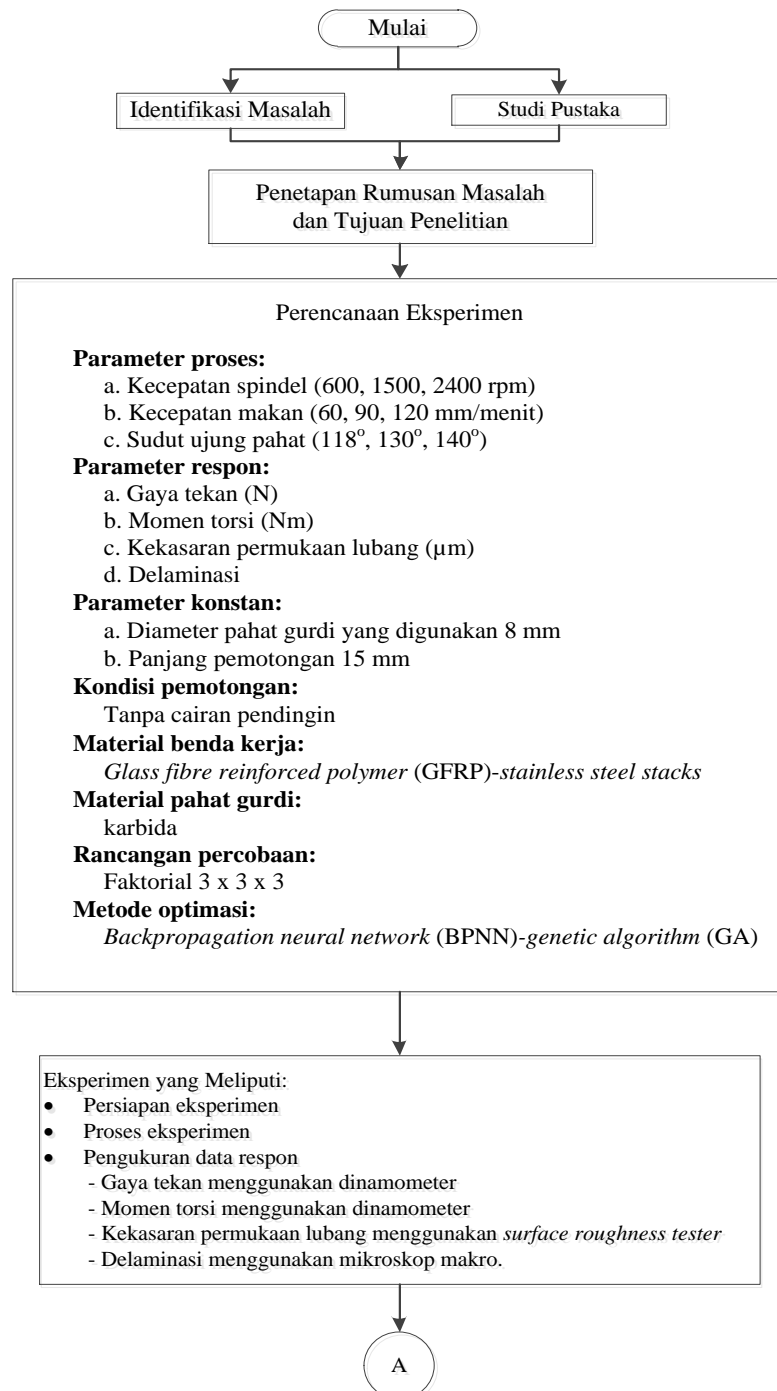


BAB 3

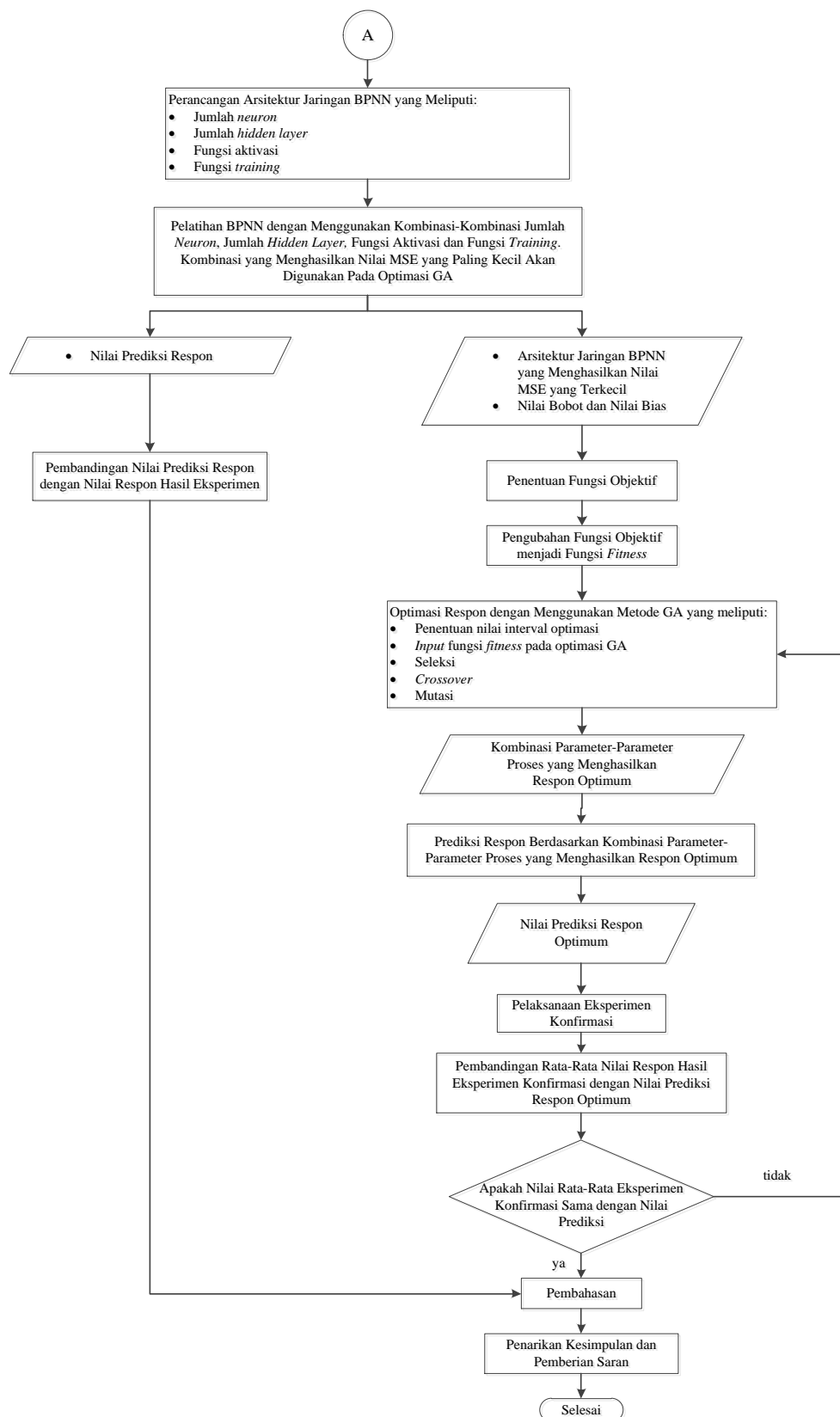
METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Tahapan Penelitian

Tahapan penelitian yang dilakukan pada penelitian ini mengikuti diagram alir yang ditunjukkan oleh Gambar 3.1.



Gambar 3.1 Diagram Alir Penelitian



Gambar 3.1 Diagram Alir Penelitian (lanjutan)



3.2 Parameter Penelitian

Parameter yang digunakan untuk mendapatkan data respon pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Parameter proses

Parameter proses merupakan parameter yang dapat dikendalikan serta nilainya dapat ditentukan berdasarkan tujuan penelitian yang dilakukan. Parameter proses yang digunakan pada penelitian ini adalah:

- a. Kecepatan spindel (n): 600, 1500, 2400 rpm.
- b. Kecepatan makan (v_f , mm/menit): 60, 90, 120 mm/menit.
- c. Sudut ujung pahat (derajat): 118° , 130° , 140° .

2. Parameter respon

Parameter respon merupakan respon yang diamati dalam penelitian. Parameter respon yang diamati pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

- a. Gaya tekan (F_z , N)
- b. Momen torsi (M_t , Nm)
- c. Kekasaran permukaan lubang (R_a , μm)
- d. Delaminasi (D)

3. Parameter konstan

Parameter konstan merupakan parameter yang tidak diteliti dalam penelitian. Nilai parameter ini dijaga selalu konstan agar tidak berubah selama percobaan, sehingga tidak mempengaruhi hasil penelitian secara signifikan. Parameter konstan pada penelitian ini adalah:

- a. Diameter pahat sebesar 8 mm.
- b. Panjang penggurdian sebesar 15 mm.

3.3 Bahan dan Peralatan Penelitian

Sebelum melakukan percobaan dilakukan persiapan-persiapan terhadap benda kerja, pahat, mesin CNC, peralatan pengukuran dan peralatan bantu yang digunakan.



3.3.1 Bahan Penelitian

1. Pahat gurdi

Pahat yang digunakan pada penelitian ini adalah *twist drill* diameter 8 mm dengan material pahat gurdi adalah karbida. Sudut ujung pahat yang digunakan adalah 118° , 130° dan 140° . Pahat karbida *twist drill* ditunjukkan pada Gambar 3.2.



Gambar 3.2 Pahat Karbida *Twist Drill*

Spesifikasi pahat gurdi yang digunakan adalah sebagai berikut:

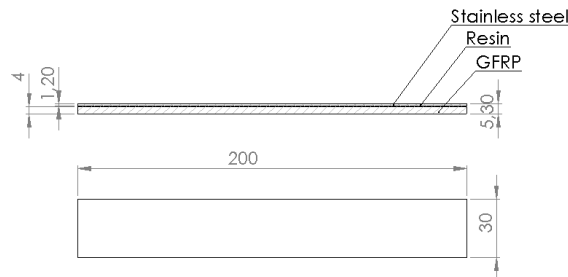
Material	= karbida
Merek dagang	= Sumitomo
Jumlah alur	= 2 buah
Sudut puntir	= 30°
Diameter	= 8 mm
Panjang alur	= 49,4 mm
Panjang total pahat	= 91,4 mm

2. Benda kerja

Benda kerja yang digunakan dalam penelitian ini diperoleh dari PT. *Garuda Maintenance Facility* (GMF), yaitu material GFRP-*stainless steel stacks*. Jenis *stainless steel* yang digunakan adalah AMS 5528. *Mechanical properties* material *stainless steel* AMS 5528 dapat dilihat pada lampiran A. Dimensi benda kerja adalah panjang 200 mm dan lebar 30 mm. Tebal masing-masing material adalah *stainless steel* = 1,2 mm, GFRP = 4 mm, dan resin = 0.1 mm. Posisi material *stainless steel* berada diatas dan material GFRP berada dibawah. Kedua material ini



ditumpuk dan direkatkan dengan menggunakan resin jenis Loctite EA 934NA. Gambar 3.3 menunjukkan ukuran spesimen GFRP-stainless steel stacks.



Gambar 3.3 Ukuran Spesimen GFRP/*Stainless Steel Stacks*

3.3.2 Peralatan Penelitian

1. Mesin CNC

Penelitian ini menggunakan mesin CNC *Brother TC-22A* seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3.4 dengan spesifikasi sebagai berikut:

- Merek : *Brother*
- Negara Pembuat : Jepang
- Model : TC-22A
- Panjang gerak sumbu X : 500 mm
- Panjang gerak sumbu Y : 400 mm
- Panjang gerak sumbu Z : 410 mm
- Putaran spindel : 12.000 rpm



Gambar 3.4 Mesin CNC *Brother TC-22A*



2. Dinamometer

Dinamometer yang digunakan dalam penelitian ini adalah dinamometer merek Kistler tipe 9272. Gaya yang diukur dengan menggunakan dinamometer pada saat proses penggurdian dilakukan adalah gaya tekan (F_z) dan momen torsi (M_t). Dinamometer Kistler 9272 ditunjukkan pada Gambar 3.5.



Gambar 3.5 Dinamometer Tipe 9272

3. Alat akuisisi data tipe 5697A

Alat akuisisi data yang digunakan dalam penelitian ini adalah DAQ Kistler tipe 5697A yang terhubung dengan perangkat lunak *DynoWare* pada komputer melalui kabel USB. Alat akuisisi data ini digunakan untuk mengolah dan memperbesar sinyal dan memiliki 8 *channel output* dengan resolusi yang tinggi. DAQ Kistler tipe 5697A ditunjukkan pada Gambar 3.6.



Gambar 3.6 Alat Akuisisi Data Tipe 5697A



4. *Charge amplifier* tipe 5070A

Charge amplifier digunakan untuk menampilkan hasil pengukuran gaya tekan dan momen torsi yang terhubung dengan dinamometer. *Charge amplifier* ini ditunjukkan pada Gambar 3.7.



Gambar 3.7 *Charge Amplifier* Tipe 5070A

5. *Notebook*

Notebook Compaq Presario digunakan untuk menampilkan dan mengolah data hasil percobaan. *Notebook* yang sudah memiliki perangkat lunak *DynoWare* ditunjukkan pada Gambar 3.8.



Gambar 3.8 *Notebook* dengan Perangkat Lunak *DynoWare*



6. *Surface roughness tester*

Pengukuran kekasaran permukaan lubang pada penelitian ini dilakukan dengan menggunakan Mitutoyo *surf test* SJ-310 yang memiliki kecermatan sebesar 0,001 μm . Gambar 3.9 menunjukkan alat ukur Mitutoyo *surf test* SJ-310.



Gambar 3.9 Mitutoyo *Surf test* SJ-310

7. Mikroskop makro

Mikroskop makro digunakan untuk memperbesar gambar lubang hasil penggurdian supaya delaminasi pada lubang keluar (*exit delamination*) yang terjadi terlihat dengan jelas. Gambar lubang hasil perbesaran kemudian diambil dengan menggunakan kamera dan diukur faktor delaminasinya dengan menggunakan perangkat lunak *Autocad*. Mikroskop makro ditunjukkan pada Gambar 3.10.



Gambar 3.10 Mikroskop Makro *Carl Zeiss Stemi DV4 Series*
Stereomicroscopes



8. Mistar insut (*vernier caliper*)

Mistar insut digunakan untuk mengukur dimensi spesimen uji. Mistar insut yang digunakan mempunyai kecermatan 0,05 mm. Mistar insut ditunjukkan pada Gambar 3.11.



Gambar 3.11 Mistar Ingsut

9. Mesin gerinda pahat gurdi (*drill resharpening grinder*)

Drill resharpening grinder digunakan untuk membentuk sudut ujung pahat sesuai dengan level parameter proses yang telah ditentukan sebelumnya, yaitu 118°, 130°, dan 140°. Proses pembentukan sudut ujung pahat ini dilakukan dengan menggunakan *drill resharpening grinder* merk Vertex seperti yang ditunjukkan Gambar 3.12.



Gambar 3.12 *Drill Resharpening Grinder*



3.4 Rancangan Percobaan

3.4.1 Pengaturan Parameter Proses pada Mesin

Penentuan parameter proses yang digunakan pada eksperimen ini ditunjukkan pada Tabel 3.1.

Tabel 3.1 Parameter Proses dan Masing-Masing Level

Parameter Proses			Level 1	Level 2	Level 3
A	Kecepatan spindel	rpm	600	1500	2400
B	Kecepatan makan	mm/menit	60	90	120
C	Sudut ujung pahat	derajat	118	130	140

3.4.2 Pemilihan Rancangan Percobaan

Penelitian ini menggunakan rancangan percobaan faktorial. Ada tiga parameter proses yang digunakan dalam penelitian ini, dan masing-masing parameter proses mempunyai tiga level. Rancangan seperti ini bisa juga disebut desain faktorial 3 x 3 x 3. Respon-respon yang diamati pada penelitian ini adalah gaya tekan, momen torsi kekasaran permukaan lubang dan delaminasi. Rancangan percobaan ditunjukkan pada Tabel 3.2.

Tabel 3.2 Desain Eksperimen Faktorial 3 x 3 x 3

Parameter Proses			Parameter Respon											
Kecepatan Spindel (rpm)	Kecepatan Makan (mm/min)	Sudut Ujung Pahat	Gaya Tekan (N)			Momen Torsi (Nm)			Kekasaran Permukaan (μm)			Delaminasi		
			Rep. 1	Rep. 2	Rep. 3	Rep. 1	Rep. 2	Rep. 3	Rep. 1	Rep. 2	Rep. 3	Rep. 1	Rep. 2	Rep. 3
600	60	118												
		130												
		140												
	90	118												
		130												
		140												
	120	118												
		130												
		140												



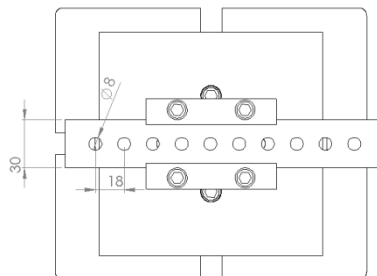
Tabel 3.1 Desain Eksperimen Faktorial 3 x 3 x 3 (lanjutan)

1500	60	118													
		130													
		140													
	90	118													
		130													
		140													
	120	118													
		130													
		140													
2400	60	118													
		130													
		140													
	90	118													
		130													
		140													
	120	118													
		130													
		140													

3.5 Prosedur Percobaan

Langkah-langkah percobaan yang dilakukan pada penelitian ini untuk mendapatkan data gaya tekan, momen torsi, kekasaran permukaan lubang dan delaminasi adalah sebagai berikut:

1. Penyiapan spesimen uji yang meliputi penyesuaian ukuran, penomoran spesimen, dan pemberian tanda pada spesimen yang akan digurdi. Jarak antar lubang penggurdian sebesar 18 mm seperti ditunjukkan pada Gambar 3.13.



Gambar 3.13 Jarak Antar Lubang pada Penggurdian Benda Kerja

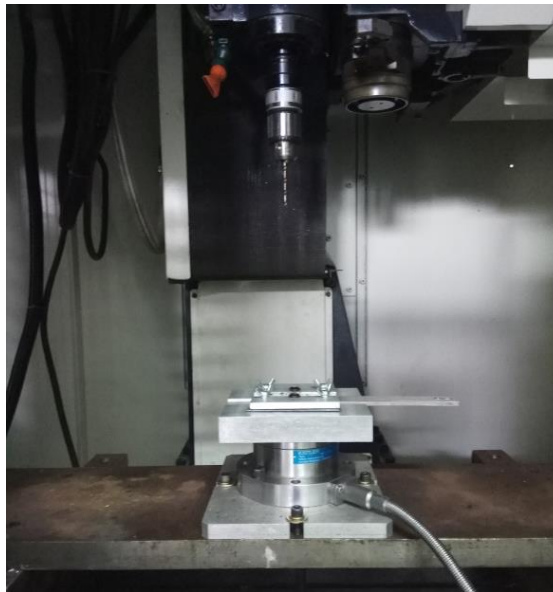


2. Pemasangan dinamometer beserta kelengkapannya pada mesin CNC seperti ditunjukkan pada Gambar 3.14.



Gambar 3.14 Dinamometer beserta Kelengkapannya

3. Pemasangan spesimen benda kerja pada dinamometer dengan *jig* yang telah dipasang pada mesin seperti ditunjukkan pada Gambar 3.15.



Gambar 3.15 *Jig* untuk Spesimen Benda Kerja

4. Pengasahan ujung pahat gurdi sesuai dengan sudut ujung pahat gurdi yang ditetapkan dan memasang pahat gurdi pada spindel mesin.
5. Pengaturan parameter-parameter proses yang telah ditetapkan pada program CNC sesuai dengan rancangan percobaan.

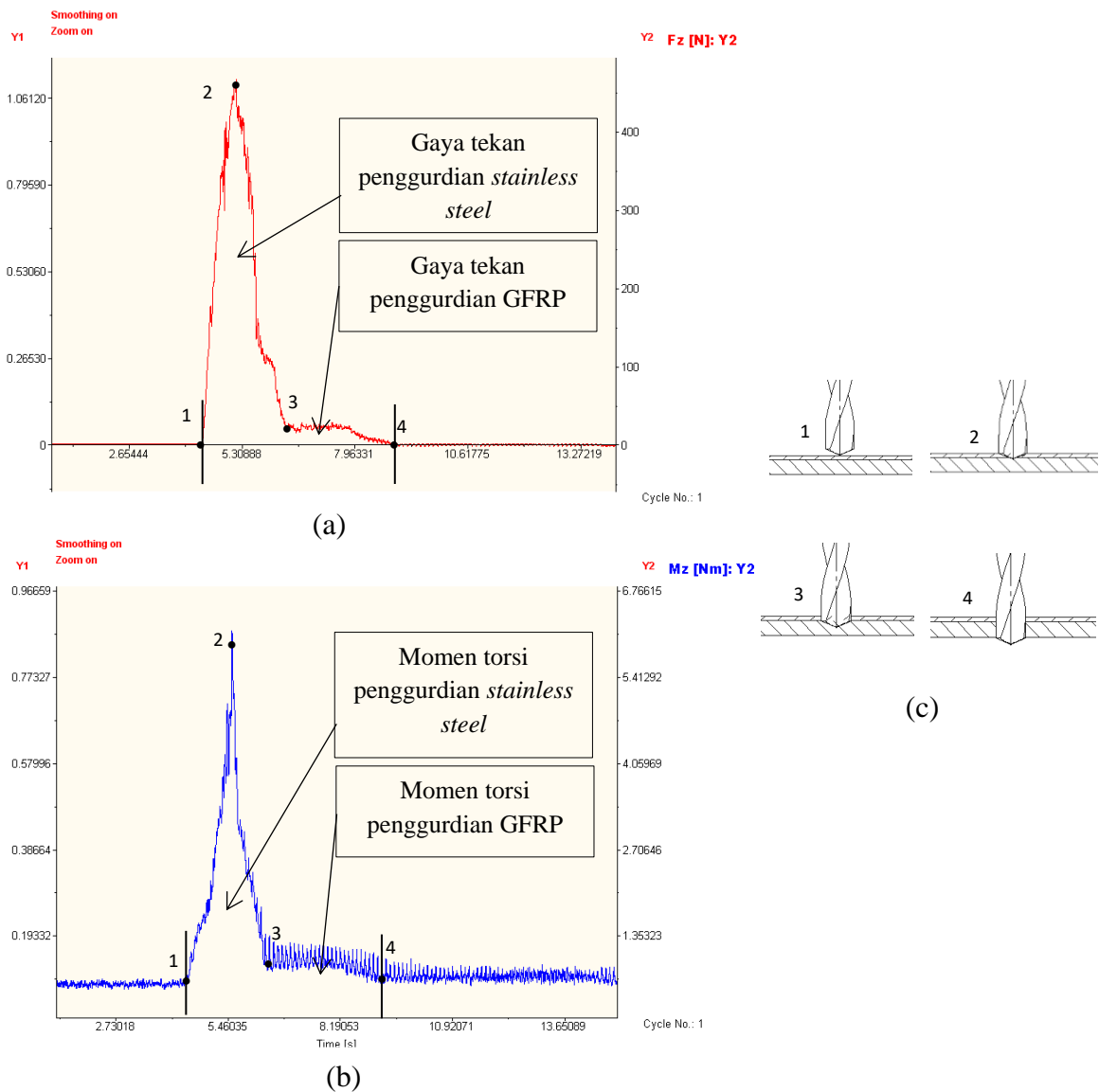


6. Penggurdian spesimen sesuai dengan seting parameter proses yang telah ditentukan.
7. Penyimpanan data grafik gaya tekan dan momen torsi yang diperoleh dari dinamometer untuk selanjutnya diolah sebagai data parameter respon penelitian.
8. Pelepasan spesimen uji setelah proses penggurdian selesai.
9. Pengulangan langkah ketiga hingga kedelapan untuk kombinasi parameter proses berikutnya.
10. Pengukuran kekasaran permukaan dengan menggunakan *surface roughness tester* untuk masing-masing lubang.
11. Pengambilan gambar lubang yang telah diperbesar dengan menggunakan mikroskop makro kemudian mengukur faktor delaminasi lubang dengan bantuan perangkat lunak *Autocad* untuk masing-masing lubang.

3.6 Pengukuran Data Respon

3.6.1 Pengukuran Gaya Tekan dan Momen Torsi

Hasil pengukuran gaya tekan dan momen torsi dengan menggunakan dinamometer selama proses pemotongan dapat dilihat pada grafik yang ditampilkan oleh perangkat lunak *Dyno Wire*. Gambar 3.16 (a) dan (b) menunjukkan grafik hasil pengukuran gaya tekan dan momen torsi pada proses penggurdian dengan menggunakan kecepatan spindel sebesar 600 rpm, kecepatan makan sebesar 90 mm/menit dan sudut ujung pahat sebesar 130°. Titik 1 merupakan posisi dimana ujung pahat berada pada permukaan benda kerja dan titik 4 merupakan posisi dimana ujung pahat dan sisi potong pahat telah menembus benda kerja. Nilai gaya tekan dan momen torsi yang digunakan pada penelitian ini adalah gaya tekan dan momen torsi maksimum yang dihasilkan pada penggurdian *stainless steel*, yaitu pada titik 2.



Gambar 3.16 (a). Grafik Pengukuran Gaya Tekan. (b). Grafik Pengukuran Momen Torsi. (c). Posisi Pahat Pada Grafik Gaya Tekan dan Momen Torsi.

Grafik dinamometer menampilkan gaya tekan dan momen torsi sebagai fungsi dari waktu, sehingga untuk mencari rata-rata gaya tekan maupun momen torsi dari titik 1 sampai ke titik 4 perlu menghitung waktu penggurdian. Waktu penggurdian dapat dihitung dengan rumus sebagai berikut:

$$t_c = \frac{L_t}{V_f} \text{ (menit)} \quad (3.1)$$



Dengan:

t_c = waktu pemotongan/penggurdian (menit)

L_t = panjang penggurdian (mm)

V_f = kecepatan makan (mm/menit)

L_t (panjang total) dapat ditentukan dengan menggunakan rumus sebagai berikut:

$$L_t = L_v + L_w + L_n \quad (\text{mm}) \quad (3.2)$$

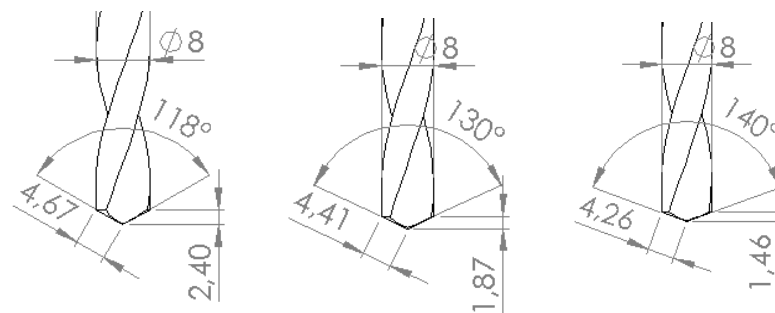
Dengan:

L_v = panjang langkah awal penggurdian (mm)

L_w = panjang penggurdian benda kerja (mm)

L_n = panjang langkah akhir penggurdian (mm)

Nilai gaya tekan dan momen torsi pada proses penggurdian akan di pengaruhi oleh panjang ujung pahat dan lebar pemotongan. Panjang ujung pahat dan lebar pemotongan tergantung pada sudut ujung pahat yang dibentuk, Gambar 3.17 menunjukkan panjang ujung pahat dan lebar pemotongan untuk masing-masing sudut ujung pahat yang digunakan.



Gambar 3.17 Panjang Ujung Pahat dan Lebar Pemotongan



3.6.2 Pengukuran Kekasaran Permukaan Lubang

Langkah-langkah dari pengukuran kekasaran permukaan lubang adalah sebagai berikut:

1. Pengkalibrasian sensor dari *surface roughness tester*.
2. Pemosisian spesimen uji di meja rata.
3. Penyentuhan ujung sensor dari *surface roughness tester* pada spesimen uji.
4. Pengaktifan *surface roughness tester* untuk melakukan proses pengukuran kekasaran permukaan lubang. Angka kekasaran permukaan yang diamati adalah kekasaran aritmatika (R_a) yang dinyatakan dalam μm .
5. Pembacaan hasil kekasaran permukaan lubang yang ditampilkan pada layar *surface roughness tester*.
6. Pengulangan langkah ketiga hingga kelima untuk mendapatkan hasil kekasaran permukaan pada setiap lubang.

3.6.3 Pengukuran Delaminasi

Langkah-langkah dari pengukuran delaminasi adalah sebagai berikut:

1. Penyiapan specimen uji.
2. Pemosisian spesimen uji pada mikroskop makro untuk memperbesar gambar lubang hasil penggurdian supaya delaminasi pada lubang keluar (*exit delamination*) yang terjadi pada material komposit terlihat jelas.
3. Pengambilan gambar perbesaran lubang hasil penggurdian dengan menggunakan kamera.
4. Pemasukkan gambar lubang ke dalam perangkat lunak *Autocad*.
5. Penentuan titik pusat lubang hasil penggurdian.
6. Pengukuran D_{max} lubang hasil penggurdian.
7. Penghitungan faktor delaminasi lubang keluar (*exit delamination*) dengan menggunakan rumus 2.27.
8. Pengulangan langkah ketiga hingga keenam untuk mendapatkan hasil delaminasi untuk setiap lubang.



3.7 Karakteristik Respon Optimal

Karakteristik respon optimal yang digunakan pada penelitian ini adalah semakin kecil semakin baik, dan berlaku untuk gaya tekan, momen torsi, kekasaran permukaan lubang dan delaminasi. Nilai gaya tekan, momen torsi, kekasaran permukaan lubang dan delaminasi yang paling diharapkan adalah yang paling minimum.

3.8 Metoda Optimasi Menggunakan BPNN-GA.

Metode optimasi pada penelitian ini dibagi menjadi dua bagian, yaitu metode prediksi nilai respon dengan menggunakan *backpropagation neural network* (BPNN) dan metode optimasi nilai respon dengan menggunakan *genetic algorithm* (GA). Gabungan dari kedua metode ini disebut sebagai metode BPNN-GA. Langkah-langkah metode BPNN-GA dapat dijelaskan sebagai berikut.

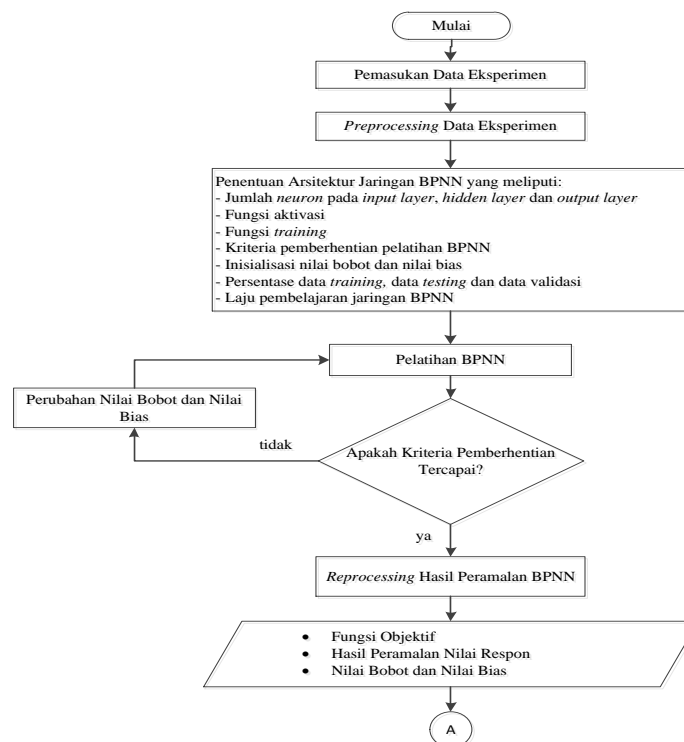
1. Pemasukan data hasil eksperimen penggurdian.
2. *Preprocessing* data *input* BPNN. *Preprocessing* digunakan untuk melakukan normalisasi data eksperimen yang memiliki satuan dan interval yang berbeda-beda menjadi data yang non-dimensional dengan interval diantara -1 sampai 1.
3. Penentuan arsitektur jaringan BPNN yang meliputi:
 - a. Penentuan jumlah *neuron* pada *input layer*, *hidden layer* dan *output layer*, fungsi aktivasi yang digunakan pada *hidden layer* dan fungsi *training* yang digunakan untuk menyelesaikan arsitektur BPNN.
 - b. Penentuan kriteria pemberhentian BPNN. Kriteria pemberhentian tersebut terdiri dari jumlah *epoch* maksimum, nilai performa maksimum, nilai gradien maksimum, dan jumlah *epoch* validasi maksimum.
 - c. Inisialisasi nilai bobot dan nilai bias yang digunakan sesuai dengan *default* perangkat lunak Matlab seri R2013a.
 - d. Pemilihan secara acak data *training*, data *testing* dan data validasi berdasarkan persentase yang telah ditetapkan untuk data *training*, data *testing* dan data validasi.
 - e. Penentuan laju pembelajaran peramalan BPNN.



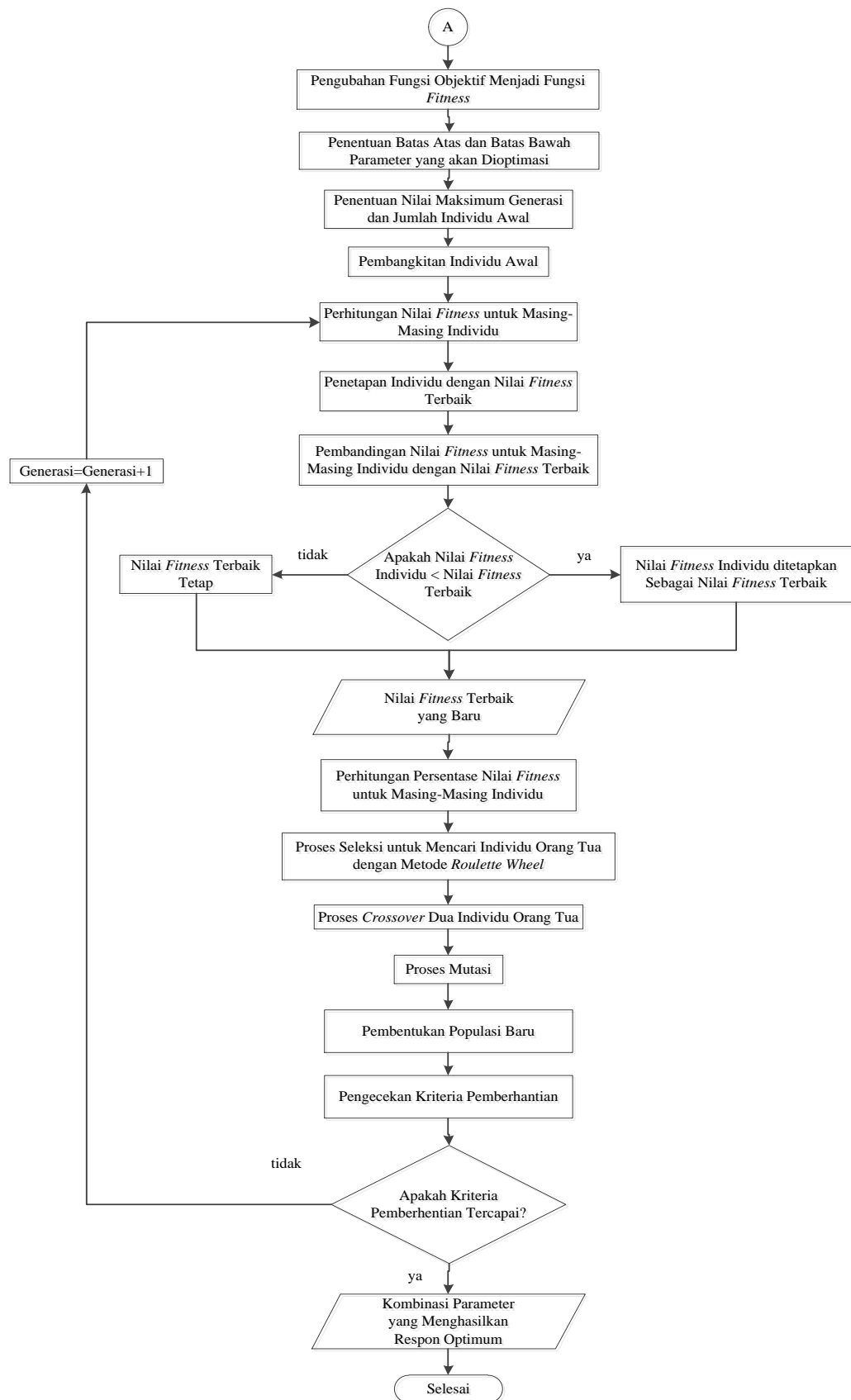
4. Pelatihan BPNN.
5. Pemeriksaan terhadap kriteria pemberhentian mana yang telah tercapai. Bila salah satu kriteria pemberhentian tersebut belum tercapai, maka pelatihan dilakukan kembali dengan mengulangi langkah keempat dengan merubah nilai bobot dan nilai bias berdasarkan fungsi *training*.
6. *Reprocessing* hasil peramalan BPNN dilakukan untuk memperoleh nilai hasil peramalan yang sebenarnya, bukan nilai-nilai dalam interval -1 sampai 1.
7. Pencatatan hasil dari proses BPNN adalah fungsi objektif, nilai prediksi respon, nilai bobot dan nilai bias. Nilai bobot dan nilai bias dapat dilihat pada lampiran B.
8. Pengubahan fungsi objektif yang diperoleh dari BPNN menjadi fungsi *fitness*. Fungsi *fitness* ini akan diminimalkan nilainya dengan menggunakan GA.
9. Menentukan batas atas dan batas bawah dari parameter proses yang akan dioptimasi dengan menggunakan GA.
10. Penentuan jumlah generasi maksimum dan jumlah individu awal.
11. Pembangkitan individu awal.
12. Penghitungan nilai *fitness* untuk masing-masing individu.
13. Penetapan individu dengan nilai *fitness* terbaik.
14. Perbandingan nilai *fitness* untuk masing-masing individu dengan nilai *fitness* terbaik
15. Pemeriksaan apakah nilai *fitness* individu lebih kecil daripada nilai *fitness* terbaik. Jika nilai *fitness* individu lebih kecil daripada nilai *fitness* terbaik, maka nilai *fitness* individu tersebut ditetapkan sebagai nilai *fitness* terbaik yang baru. Jika tidak, maka nilai *fitness* terbaik yang lama ditetapkan sebagai nilai *fitness* yang baru.
16. Penghitungan persentase nilai *fitness* untuk masing-masing individu.
17. Proses seleksi untuk mencari individu orang tua dengan menggunakan metode *Roulette Wheel*. Proses seleksi dilakukan untuk memberikan kesempatan yang lebih besar bagi anggota populasi yang paling baik untuk terpilih sebagai orang tua.



18. Penyilangan dua individu orang tua. Penyilangan adalah proses mengawinkan orang tua yang terbaik untuk menghasilkan keturunan baru (*offspring*). Pada penelitian ini, proses penyilangan dilakukan dengan menggunakan nilai probabilitas penyilangan sebesar 0,8.
19. Pemutasian untuk melakukan penggantian gen yang hilang dari individu akibat proses seleksi, sehingga memungkinkan munculnya kembali gen-gen yang tidak muncul pada saat proses pemilihan individu. Pada penelitian ini, proses mutasi dilakukan dengan menggunakan nilai probabilitas mutasi sebesar 0,05.
20. Pembentukan populasi baru hasil dari penyilangan dan mutasi.
21. Pemeriksaan kriteria pemberhentian yang berupa jumlah generasi maksimum. Apabila kriteria pemberhentian sudah tercapai, maka pengaturan parameter proses yang menghasilkan respon optimum sudah didapatkan. Namun apabila kriteria pemberhentian belum tercapai, maka lakukan penghitungan kembali dari langkah ke-12 sampai langkah ke-20.



Gambar 3.18 Diagram Alir Metode BPNN-GA



Gambar 3.18 Diagram Alir Metode BPNN-GA (lanjutan)

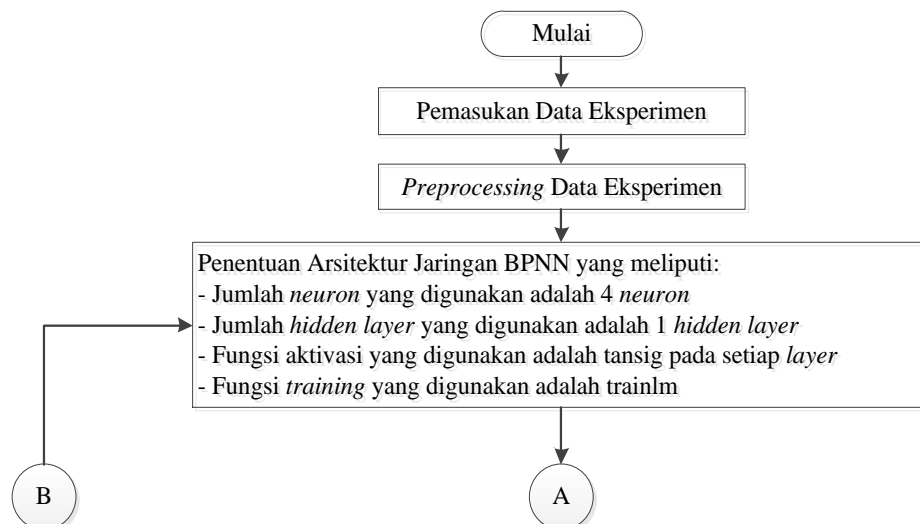


BPNN dapat menghasilkan prediksi respon dengan tepat jika arsitektur jaringan BPNN yang digunakan menghasilkan nilai MSE terkecil. Nilai MSE yang terkecil dapat dicapai jika arsitektur jaringan BPNN yang digunakan adalah tepat. Oleh karena itu, perlu dilakukan optimasi jaringan BPNN yang meliputi penentuan jumlah *neuron*, jumlah *hidden layer*, fungsi aktivasi yang digunakan pada masing-masing *layer*, dan fungsi *training* seperti ditunjukkan pada Gambar 3.19. Langkah-langkah penentuan jumlah *neuron* dan *hidden layer* yang menghasilkan MSE terkecil pada BPNN dapat dijelaskan sebagai berikut:

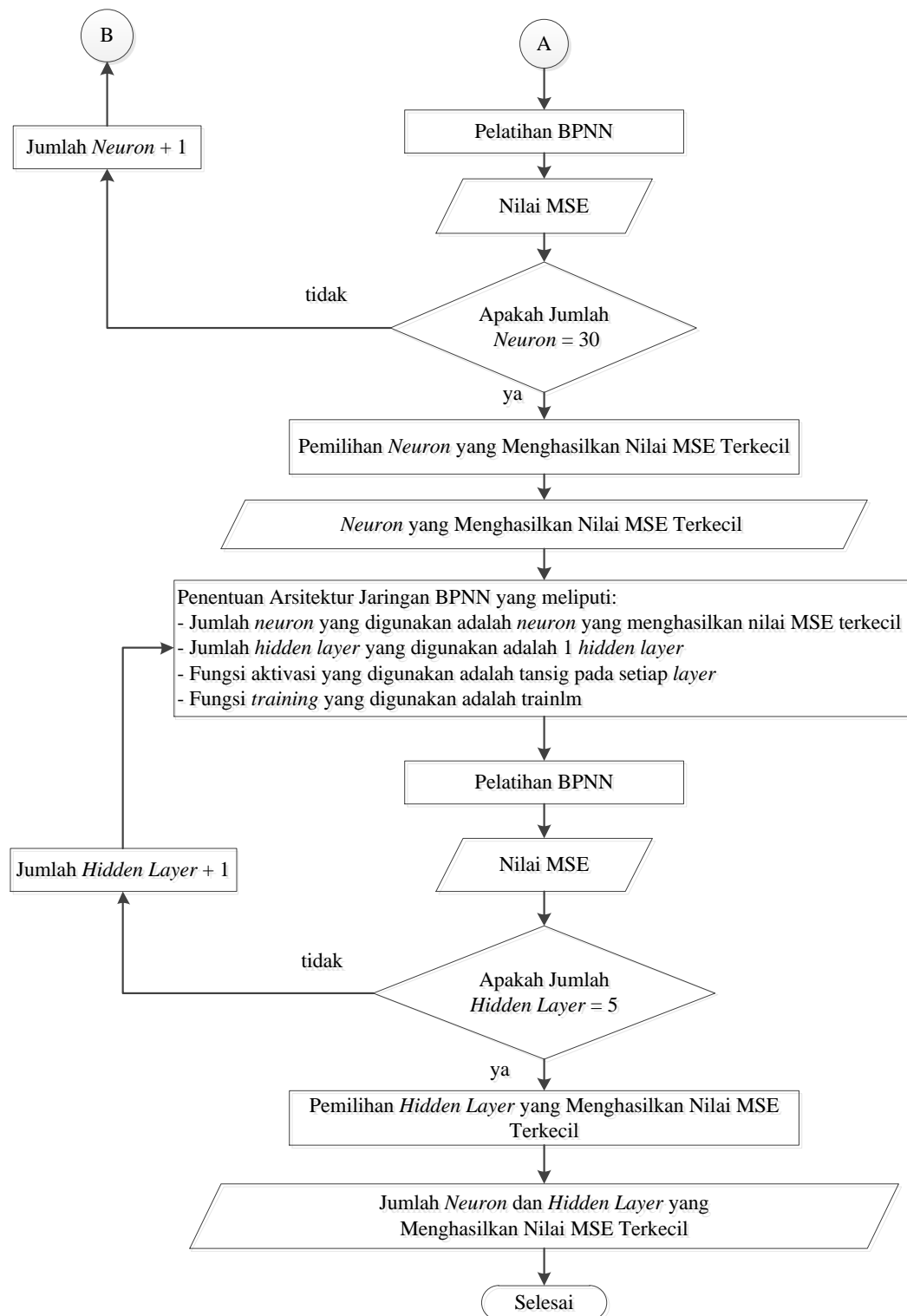
1. Pemasukan data hasil eksperimen penggurdian.
2. *Preprocessing* untuk data *input* BPNN. *Preprocessing* digunakan untuk melakukan normalisasi data eksperimen yang memiliki satuan dan interval yang berbeda-beda menjadi data yang non-dimensional dengan interval diantara -1 sampai 1.
3. Penentuan arsitektur jaringan BPNN yang meliputi:
 - a. Jumlah *neuron* yang digunakan pada setiap *hidden layer* adalah sebanyak 4 *neuron*.
 - b. Jumlah *hidden layer* yang ditetapkan adalah 1 *hidden layer*.
 - c. Fungsi aktivasi yang digunakan pada setiap *hidden layer* adalah tansig.
 - d. Fungsi *training* yang digunakan untuk menyelesaikan arsitektur BPNN adalah trainlm.
4. Pelatihan BPNN.
5. Penyimpanan nilai MSE dari pelatihan BPNN.
6. Pemeriksaan terhadap jumlah *neuron*. Apabila jumlah *neuron* yang digunakan pada pelatihan BPNN tidak sama dengan 30, maka dilakukan pengulangan langkah ke-3 hingga langkah ke-6 dengan menambahkan satu *neuron* pada setiap iterasinya. Jika jumlah *neuron* yang digunakan pada pelatihan BPNN sama dengan 30, maka dilakukan pemilihan *neuron* yang menghasilkan nilai MSE terkecil dari seluruh pelatihan jaringan.
7. Penentuan arsitektur jaringan BPNN yang meliputi:



- a. Jumlah *neuron* yang digunakan pada setiap *hidden layer* sama dengan *neuron* yang menghasilkan nilai MSE terkecil dari seluruh pelatihan jaringan.
 - b. *Hidden layer* yang digunakan adalah satu.
 - c. Fungsi aktivasi yang digunakan pada setiap *hidden layer* adalah tansig.
 - d. Fungsi *training* yang digunakan untuk menyelesaikan arsitektur BPNN adalah trainlm.
8. Pelatihan BPNN.
 9. Penyimpanan nilai MSE dari pelatihan BPNN.
 10. Pemeriksaan terhadap jumlah *hidden layer*. Apabila jumlah *hidden layer* yang digunakan pada pelatihan BPNN tidak sama dengan 5, maka dilakukan pengulangan langkah ke-7 hingga langkah ke-10 dengan menambahkan satu *hidden layer* pada setiap iterasinya. Jika jumlah *hidden layer* yang digunakan pada pelatihan BPNN sama dengan 5, maka dilakukan pemilihan *hidden layer* yang menghasilkan nilai MSE terkecil dari seluruh pelatihan jaringan.
 11. Pencatatan hasil dari optimasi jaringan BPNN yang berupa jumlah *neuron* jumlah *neuron* dan jumlah *hidden layer* yang menghasilkan nilai MSE terkecil dari seluruh pelatihan jaringan.



Gambar 3.19 Diagram Alir Penentuan Jumlah *Neuron* dan *Hidden Layer* yang Menghasilkan MSE Terkecil pada BPNN



Gambar 3.19 Diagram Alir Penentuan Jumlah *Neuron* dan *Hidden Layer* yang Menghasilkan MSE Terkecil pada BPNN (lanjutan)



[Halaman ini sengaja dikosongkan]



BAB 4

OPTIMASI MULTI RESPON DAN PEMBAHASAN

4.1 Data Hasil Pengukuran

Eksperimen dilakukan dengan mengkombinasikan parameter-parameter proses gurdi pada material GFRP-*stainless steel stacks*, yang memiliki pengaruh terhadap gaya tekan (F_z), momen torsi (M_t), kekasaran permukaan lubang (SR) dan delaminasi (D). Parameter-parameter proses tersebut adalah kecepatan spindel (n), kecepatan makan (V_f), dan sudut ujung pahat (PA).

Pengukuran yang dilakukan pertama kali adalah pengukuran gaya tekan dan momen torsi dengan menggunakan dinamometer KISTLER tipe 9272. Kemudian dilakukan pengukuran kekasaran permukaan lubang dengan menggunakan Mitutoyo *surf test* SJ-310. Pengukuran delaminasi dilakukan dengan menggunakan mikroskop makro. Gambar hasil mikroskop makro kemudian diukur dengan menggunakan perangkat lunak *Autocad* untuk mendapatkan faktor delaminasi dari lubang. Hasil pengukuran secara keseluruhan ditunjukkan pada Tabel 4.1.

Tabel 4.1 Data Hasil Eksperimen

No	Kecepatan spindel	Kecepatan makan	Sudut ujung pahat	Gaya tekan (N)	Momen torsi (Nm)	Kekasaran permukaan (μm)	Delaminasi
1	600	90	140	451,80	3,559	1,986	1,108
2	2400	120	130	300,70	2,220	1,506	1,093
3	1500	90	130	288,10	2,571	1,471	1,098
4	1500	90	118	235,50	2,855	1,451	1,088
5	1500	60	140	254,50	1,416	1,220	1,150
6	2400	90	130	249,20	1,631	1,231	1,065
7	600	60	118	232,80	3,035	1,502	1,069
8	600	90	118	291,20	4,594	2,025	1,050
9	1500	60	118	152,60	2,195	1,262	1,103
10	1500	120	118	290,40	3,591	1,926	1,051
11	1500	90	140	335,00	2,225	1,512	1,115
12	600	120	118	350,30	5,350	2,595	1,054
13	600	120	130	424,60	5,331	2,291	1,073



Tabel 4.1 Data Hasil Eksperimen (lanjutan)

No	Kecepatan spindel	Kecepatan makan	Sudut ujung pahat	Gaya tekan (N)	Momen torsi (Nm)	Kekasaran permukaan (μm)	Delaminasi
14	2400	60	130	175,50	1,334	1,080	1,136
15	2400	120	118	250,90	2,708	1,484	1,068
16	1500	120	130	349,70	3,280	1,935	1,074
17	2400	90	118	190,80	2,074	1,358	1,099
18	2400	60	140	200,80	1,006	1,011	1,189
19	1500	120	140	431,70	3,114	1,986	1,124
20	1500	60	130	212,40	1,793	1,149	1,109
21	600	60	130	293,10	2,828	1,414	1,123
22	600	90	130	379,00	4,080	1,983	1,095
23	2400	90	140	299,90	1,671	1,182	1,140
24	600	120	140	555,90	5,067	2,501	1,109
25	600	60	140	342,10	2,581	1,417	1,166
26	2400	120	140	365,70	2,149	1,605	1,136
27	2400	60	118	109,20	1,597	1,043	1,095
28	600	90	140	448,50	3,625	1,850	1,111
29	2400	120	130	314,40	2,390	1,480	1,069
30	1500	90	130	279,20	2,246	1,665	1,115
31	1500	90	118	230,20	2,900	1,541	1,081
32	1500	60	140	249,50	1,448	1,140	1,135
33	2400	90	130	240,00	1,678	1,197	1,143
34	600	60	118	234,30	3,187	1,587	1,088
35	600	90	118	315,20	3,976	1,907	1,084
36	1500	60	118	160,40	2,018	1,268	1,139
37	1500	120	118	284,20	3,614	1,994	1,088
38	1500	90	140	353,80	2,123	1,649	1,131
39	600	120	118	370,20	5,666	2,411	1,056
40	600	120	130	437,20	5,211	2,568	1,050
41	2400	60	130	163,70	1,282	1,087	1,128
42	2400	120	118	257,50	2,672	1,579	1,070
43	1500	120	130	358,60	3,261	1,961	1,063
44	2400	90	118	182,50	1,911	1,352	1,099
45	2400	60	140	216,10	1,150	1,042	1,161
46	1500	120	140	430,60	3,248	1,867	1,069
47	1500	60	130	224,10	1,855	1,342	1,105
48	600	60	130	309,90	2,941	1,371	1,114



Tabel 4.1 Data Hasil Eksperimen (lanjutan)

No	Kecepatan spindel	Kecepatan makan	Sudut ujung pahat	Gaya tekan (N)	Momen torsi (Nm)	Kekasaran permukaan (μm)	Delaminasi
49	600	90	130	344,90	4,064	1,796	1,073
50	2400	90	140	286,60	1,571	1,291	1,106
51	600	120	140	546,10	5,055	2,490	1,093
52	600	60	140	339,40	2,444	1,489	1,159
53	2400	120	140	385,80	2,143	1,665	1,096
54	2400	60	118	109,40	1,551	1,144	1,160
55	600	90	140	451,30	3,681	1,957	1,119
56	2400	120	130	293,60	2,328	1,554	1,151
57	1500	90	130	280,00	2,699	1,631	1,096
58	1500	90	118	234,10	2,824	1,689	1,086
59	1500	60	140	251,00	1,514	1,192	1,169
60	2400	90	130	241,40	1,779	1,373	1,150
61	600	60	118	228,90	3,175	1,355	1,081
62	600	90	118	305,90	4,482	1,921	1,066
63	1500	60	118	158,60	2,376	1,366	1,058
64	1500	120	118	298,90	3,597	1,879	1,073
65	1500	90	140	346,70	2,255	1,589	1,128
66	600	120	118	360,10	5,632	2,513	1,050
67	600	120	130	438,60	5,287	2,387	1,055
68	2400	60	130	180,90	1,320	1,105	1,165
69	2400	120	118	250,90	2,765	1,645	1,133
70	1500	120	130	351,30	3,364	1,845	1,083
71	2400	90	118	203,40	1,920	1,181	1,101
72	2400	60	140	213,20	1,091	1,022	1,151
73	1500	120	140	445,00	3,195	1,935	1,129
74	1500	60	130	220,40	1,825	1,356	1,165
75	600	60	130	294,20	2,721	1,568	1,071
76	600	90	130	367,80	4,107	1,899	1,080
77	2400	90	140	287,10	1,564	1,341	1,178
78	600	120	140	555,10	4,989	2,593	1,089
79	600	60	140	353,10	2,400	1,302	1,074
80	2400	120	140	403,50	2,026	1,530	1,134
81	2400	60	118	118,80	1,633	1,148	1,088

Sumber: Hasil Pengukuran



4.2 Metode Peramalan BPNN

Pada peramalan dengan menggunakan BPNN, data yang dijadikan sebagai *input* adalah kombinasi parameter-parameter proses, yaitu kecepatan spindel, kecepatan makan dan sudut ujung pahat. Data yang dijadikan sebagai *output* adalah data respon, yaitu gaya tekan, momen torsi, kekasaran permukaan lubang dan delaminasi yang merupakan hasil dari eksperimen. Secara umum, tahapan-tahapan pada BPNN, adalah:

- *Pre-processing* (normalisasi) data.
- Pembuatan arsitektur jaringan (*input layer*, *hidden layer* dan *output layer*).
- Penentuan kriteria pemberhentian BPNN.
- Pelaksanaan *training*, *testing* dan validasi data.

4.2.1 *Pre-processing* (Normalisasi) Data *Input* dan *Output*

Sebelum data digunakan pada BPNN, maka data yang digunakan harus dinormalisasikan sesuai dengan interval keluaran dari fungsi aktivasi yang digunakan. Proses normalisasi data adalah proses untuk mengubah nilai data menjadi nilai yang besarnya antara -1 sampai 1. Perhitungan normalisasi data *input* dan data *output* dapat dilakukan dengan menggunakan persamaan 4.1 sebagai berikut:

$$p_n = \frac{2(p - \min(p))}{(\max(p) - \min(p))} - 1 \quad (4.1)$$

Dengan:

p = data parameter respon dari eksperimen.

p_n = data hasil normalisasi parameter respon eksperimen.

Contoh perhitungan normalisasi nilai gaya tekan untuk seting faktor kombinasi pertama adalah sebagai berikut:

1. Penentuan nilai maksimum dan minimum.

Nilai maksimum gaya tekan = 555,90 N

Nilai minimum gaya tekan = 109,20 N



2. Perhitungan normalisasi.

$$p_n = \frac{2(p - \min(p))}{(\max(p) - \min(p))} - 1$$

$$p_n = \frac{2(451,8 - 109,20)}{(555,90 - 109,20)} - 1$$

$$p_n = 0,534$$

Normalisasi juga dapat dilakukan dengan menggunakan perangkat lunak Matlab seri R2013a. Fungsi *mapminmax* yang ada pada perangkat lunak Matlab seri R2013a digunakan untuk melakukan proses normalisasi. Hasil normalisasi dari data eksperimen proses gurdi untuk setiap parameter proses dan parameter respon ditunjukkan pada Tabel 4.2.

Tabel 4.2 Normalisasi Nilai Parameter Proses dan Respon

No	Kecepatan spindel	Kecepatan makan	Sudut ujung pahat	Gaya tekan (N)	Momen torsi (Nm)	Kekasaran permukaan (μm)	Delaminasi
1	-1	0	1	0,534	0,096	0,232	-0,171
2	1	1	0	-0,143	-0,479	-0,375	-0,387
3	0	0	0	-0,199	-0,328	-0,419	-0,315
4	0	0	-1	-0,435	-0,206	-0,444	-0,459
5	0	-1	1	-0,349	-0,824	-0,736	0,441
6	1	0	0	-0,373	-0,732	-0,723	-0,784
7	-1	-1	-1	-0,447	-0,129	-0,380	-0,730
8	-1	0	-1	-0,185	0,540	0,280	-1,000
9	0	-1	-1	-0,806	-0,490	-0,682	-0,243
10	0	1	-1	-0,189	0,109	0,156	-0,982
11	0	0	1	0,011	-0,477	-0,368	-0,063
12	-1	1	-1	0,079	0,864	1	-0,946
13	-1	1	0	0,412	0,856	0,616	-0,676
14	1	-1	0	-0,703	-0,859	-0,913	0,243
15	1	1	-1	-0,366	-0,270	-0,402	-0,748
16	0	1	0	0,077	-0,024	0,167	-0,658
17	1	0	-1	-0,635	-0,542	-0,562	-0,297
18	1	-1	1	-0,590	-1	-1	1
19	0	1	1	0,444	-0,095	0,231	0,063
20	0	-1	0	-0,538	-0,662	-0,826	-0,153
21	-1	-1	0	-0,177	-0,218	-0,491	0,045
22	-1	0	0	0,208	0,319	0,228	-0,351
23	1	0	1	-0,146	-0,715	-0,784	0,297
24	-1	1	1	1	0,743	0,882	-0,153



Tabel 4.2 Normalisasi Nilai Parameter Proses dan Respon (lanjutan)

No	Kecepatan spindel	Kecepatan makan	Sudut ujung pahat	Gaya tekan (N)	Momen torsi (Nm)	Kekasaran permukaan (μm)	Delaminasi
25	-1	-1	1	0,043	-0,324	-0,488	0,676
26	1	1	1	0,148	-0,509	-0,250	0,243
27	1	-1	-1	-1	-0,746	-0,959	-0,351
28	-1	0	1	0,519	0,124	0,059	-0,117
29	1	1	0	-0,081	-0,406	-0,408	-0,730
30	0	0	0	-0,239	-0,468	-0,174	-0,063
31	0	0	-1	-0,458	-0,187	-0,331	-0,550
32	0	-1	1	-0,372	-0,810	-0,837	0,225
33	1	0	0	-0,414	-0,712	-0,765	0,333
34	-1	-1	-1	-0,440	-0,064	-0,273	-0,459
35	-1	0	-1	-0,078	0,275	0,131	-0,510
36	0	-1	-1	-0,771	-0,566	-0,676	0,279
37	0	1	-1	-0,216	0,119	0,242	-0,459
38	0	0	1	0,095	-0,521	-0,195	0,171
39	-1	1	-1	0,169	1	0,768	-0,910
40	-1	1	0	0,469	0,805	0,966	-1,000
41	1	-1	0	-0,756	-0,882	-0,904	0,117
42	1	1	-1	-0,336	-0,285	-0,283	-0,712
43	0	1	0	0,117	-0,032	0,199	-0,820
44	1	0	-1	-0,672	-0,612	-0,569	-0,297
45	1	-1	1	-0,521	-0,938	-0,961	0,604
46	0	1	1	0,439	-0,038	0,081	-0,730
47	0	-1	0	-0,486	-0,636	-0,582	-0,207
48	-1	-1	0	-0,101	-0,170	-0,545	-0,081
49	-1	0	0	0,055	0,312	-0,009	-0,676
50	1	0	1	-0,206	-0,758	-0,646	-0,189
51	-1	1	1	0,956	0,738	0,868	-0,387
52	-1	-1	1	0,031	-0,383	-0,397	0,568
53	1	1	1	0,238	-0,512	-0,174	-0,333
54	1	-1	-1	-0,999	-0,766	-0,832	0,586
55	-1	0	1	0,532	0,148	0,195	-0,009
56	1	1	0	-0,174	-0,433	-0,314	0,459
57	0	0	0	-0,235	-0,273	-0,217	-0,333
58	0	0	-1	-0,441	-0,220	-0,144	-0,477
59	0	-1	1	-0,365	-0,782	-0,771	0,712
60	1	0	0	-0,408	-0,668	-0,543	0,441
61	-1	-1	-1	-0,464	-0,069	-0,566	-0,550
62	-1	0	-1	-0,119	0,492	0,149	-0,766



Tabel 4.2 Normalisasi Nilai Parameter Proses dan Respon (lanjutan)

No	Kecepatan spindel	Kecepatan makan	Sudut ujung pahat	Gaya tekan (N)	Momen torsi (Nm)	Kekasaran permukaan (μm)	Delaminasi
63	0	-1	-1	-0,779	-0,412	-0,551	-0,892
64	0	1	-1	-0,151	0,112	0,096	-0,676
65	0	0	1	0,063	-0,464	-0,269	0,117
66	-1	1	-1	0,123	0,985	0,896	-1
67	-1	1	0	0,475	0,837	0,737	-0,928
68	1	-1	0	-0,679	-0,865	-0,882	0,658
69	1	1	-1	-0,366	-0,245	-0,199	0,189
70	0	1	0	0,084	0,012	0,053	-0,532
71	1	0	-1	-0,578	-0,608	-0,785	-0,261
72	1	-1	1	-0,534	-0,964	-0,986	0,459
73	0	1	1	0,503	-0,061	0,167	0,135
74	0	-1	0	-0,502	-0,648	-0,564	0,658
75	-1	-1	0	-0,172	-0,264	-0,296	-0,694
76	-1	0	0	0,158	0,331	0,122	-0,568
77	1	0	1	-0,203	-0,761	-0,583	0,838
78	-1	1	1	0,996	0,709	0,998	-0,441
79	-1	-1	1	0,092	-0,402	-0,632	-0,658
80	1	1	1	0,318	-0,562	-0,345	0,207
81	1	-1	-1	-0,957	-0,731	-0,827	-0,459

Sumber: Hasil Perhitungan

Data pada Tabel 4.2 tersebut digunakan sebagai parameter *input* dan parameter *output* pada BPNN dengan menggunakan perangkat lunak Matlab seri R2013a.

4.2.2 Penentuan Arsitektur Jaringan

Pada penelitian ini, penentuan arsitektur jaringan yang terbaik untuk menghasilkan nilai *mean square error* (MSE) yang terkecil dilakukan berdasarkan *trial and error*. Parameter yang divariasikan pada BPNN dibatasi pada:

- Jumlah *neuron* dalam setiap *hidden layer*, yaitu 4 sampai 30.
- Jumlah *hidden layer*, yakni 1 sampai 5 *hidden layer*.
- Fungsi aktivasi pada *hidden layer* yaitu tansig karena normalisasi yang dilakukan memiliki interval -1 sampai 1.
- Fungsi aktivasi pada *output layer* yaitu purelin.



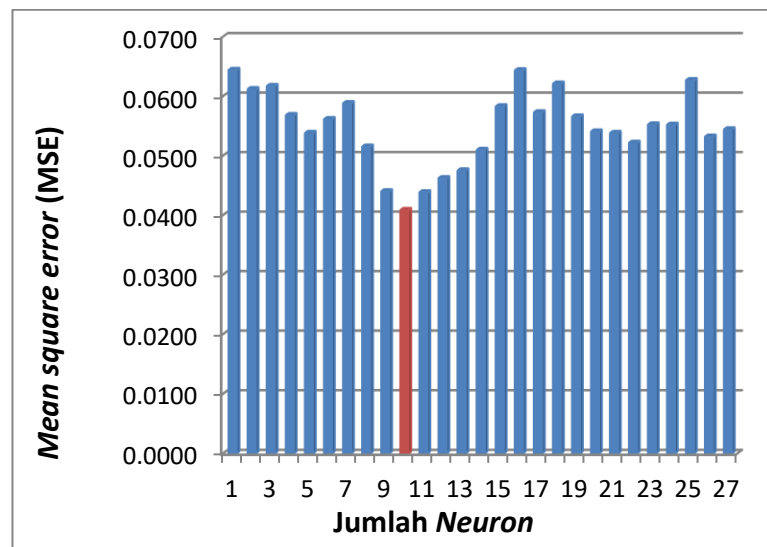
- Fungsi *training*, yaitu *Levenberg Markuens Backpropagation* (trainlm).

Berdasarkan parameter-parameter yang divariasikan, terdapat 27 kombinasi yang akan dihitung nilai MSE-nya. Semua kombinasi menggunakan *learning rate* sebesar 0,05 dan *performance goal* sebesar 0,0001 (Rong, 2015). Tabel 4.3 menunjukkan 27 kombinasi jaringan dan nilai MSE yang dihasilkan. Kombinasi jaringan yang dipilih adalah kombinasi yang menghasilkan nilai MSE terkecil, yaitu kombinasi nomor 10 yang menggunakan 13 *neuron*. Gambar 4.1 menunjukkan penentuan *neuron* yang menghasilkan MSE yang paling kecil.

Tabel 4.3 Kombinasi Parameter BPNN untuk Penentuan Jumlah *Neuron*.

Jaringan ke	Jumlah <i>Neuron</i>	Jumlah <i>Hidden Layer</i>	Fungsi Aktivasi	Fungsi Pelatihan	MSE
1	4	1	tansig	trainlm	0,0644
2	5	1	tansig	trainlm	0,0612
3	6	1	tansig	trainlm	0,0617
4	7	1	tansig	trainlm	0,0568
5	8	1	tansig	trainlm	0,0538
6	9	1	tansig	trainlm	0,0561
7	10	1	tansig	trainlm	0,0588
8	11	1	tansig	trainlm	0,0515
9	12	1	tansig	trainlm	0,0440
10	13	1	tansig	trainlm	0,0408
11	14	1	tansig	trainlm	0,0438
12	15	1	tansig	trainlm	0,0462
13	16	1	tansig	trainlm	0,0475
14	17	1	tansig	trainlm	0,0509
15	18	1	tansig	trainlm	0,0583
16	19	1	tansig	trainlm	0,0643
17	20	1	tansig	trainlm	0,0573
18	21	1	tansig	trainlm	0,0621
19	22	1	tansig	trainlm	0,0566
20	23	1	tansig	trainlm	0,0540
21	24	1	tansig	trainlm	0,0538
22	25	1	tansig	trainlm	0,0521
23	26	1	tansig	trainlm	0,0552
24	27	1	tansig	trainlm	0,0552
25	28	1	tansig	trainlm	0,0627
26	29	1	tansig	trainlm	0,0532
27	30	1	tansig	trainlm	0,0544
MSE minimum					0,0408

Sumber: Hasil Perhitungan



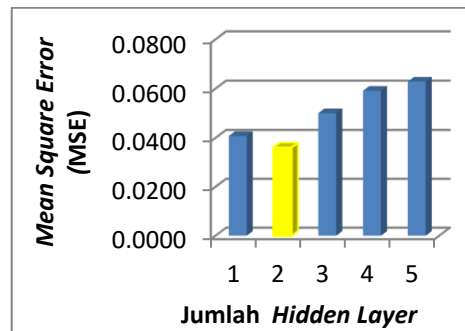
Gambar 4.1 Pemilihan jumlah *neuron* yang Menghasilkan MSE Terkecil

Setelah diperoleh jumlah *neuron* yang menghasilkan MSE terkecil, kemudian dibuat kembali jaringan dengan menambahkan jumlah *hidden layer* dengan jumlah *neuron* tetap sebanyak 13. Hal ini dilakukan untuk mengetahui apakah nilai MSE terkecil dihasilkan pada jumlah *hidden layer* yang lebih banyak. Tabel 4.4 menunjukkan 5 kombinasi jaringan dengan penambahan jumlah *hidden layer* pada jumlah *neuron* yang sama. Kombinasi jaringan yang dipilih adalah kombinasi nomor 2 dengan jumlah *hidden layer* sebanyak 2. Gambar 4.2 menunjukkan diagram jaringan yang menghasilkan MSE yang paling kecil dengan penambahan jumlah *hidden layer*.

Tabel 4.4 Kombinasi Parameter BPNN untuk penentuan Jumlah *Hidden Layer*

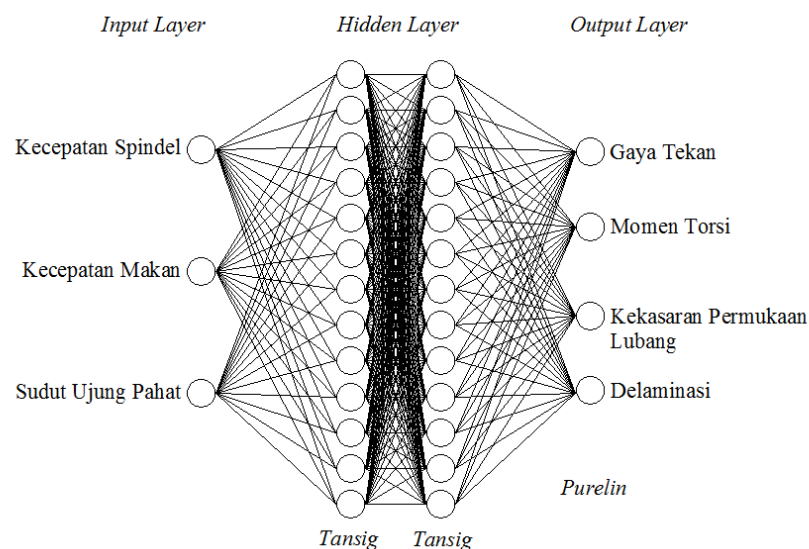
Jaringan ke	Jumlah <i>Neuron</i>	Jumlah <i>Hidden Layer</i>	Fungsi Aktivasi	Fungsi Pelatihan	MSE
1	13	1	tansig	trainlm	0,0408
2	13	2	tansig	trainlm	0,0361
3	13	3	tansig	trainlm	0,0501
4	13	4	tansig	trainlm	0,0592
5	13	5	tansig	trainlm	0,0629
MSE minimum					0,0361

Sumber: Hasil Perhitungan



Gambar 4.2 Pemilihan Jumlah *Hidden Layer* yang Menghasilkan MSE Terkecil

Nilai MSE terkecil dicapai saat jumlah *hidden layer* yang digunakan adalah 1 seperti ditunjukkan pada Tabel 4.4, sehingga jumlah *hidden layer* yang digunakan untuk prediksi BPNN adalah 1 *hidden layer*. Hasil perhitungan untuk menentukan arsitektur jaringan BPNN menunjukkan bahwa nilai MSE terkecil dapat dicapai dengan menggunakan jaringan 3-13-13-4. Fungsi aktivasi pada masing-masing *hidden layer* dengan menggunakan tansig dan pada *output layer* dengan menggunakan purelin, sedangkan fungsi pelatihan dengan menggunakan trainlm. Jaringan 3-13-13-4 memiliki arti bahwa jaringan mempunyai 3 *input layer*, 2 *hidden layer* dengan 13 *neuron* pada masing-masing *hidden layer*, dan 4 *output layer*. Arsitektur jaringan yang terpilih ditunjukkan pada Gambar 4.3.



Gambar 4.3 Arsitektur Jaringan yang Dipilih



4.2.3 Kriteria Pemberhentian Pelatihan BPNN

Proses pelatihan BPNN akan dihentikan apabila salah satu kriteria pemberhentian telah tercapai. Kriteria pemberhentian BPNN adalah sebagai berikut:

- Jumlah *epoch* maksimum sebesar 10.000.
- Nilai performa maksimum sebesar 10^{-4} .
- Nilai gradien maksimum sebesar 10^{-5} .
- Waktu iterasi maksimum sebesar 200 detik.

4.2.4 Data Peramalan BPNN

Pada umumnya, data yang digunakan pada proses BPNN terdiri dari data *training*, *testing* dan validasi. Persentase data yang digunakan untuk *training*, *testing* dan validasi berturut-turut adalah sebanyak 70%, 15%, dan 15% dari jumlah data hasil eksperimen. Data yang digunakan sebagai data *training* sebanyak 57 data yang ditunjukkan pada Tabel 4.5. Gambar 4.4 menunjukkan grafik hasil eksperimen dan hasil prediksi BPNN untuk data *training*.

Tabel 4.5 Data *Training*

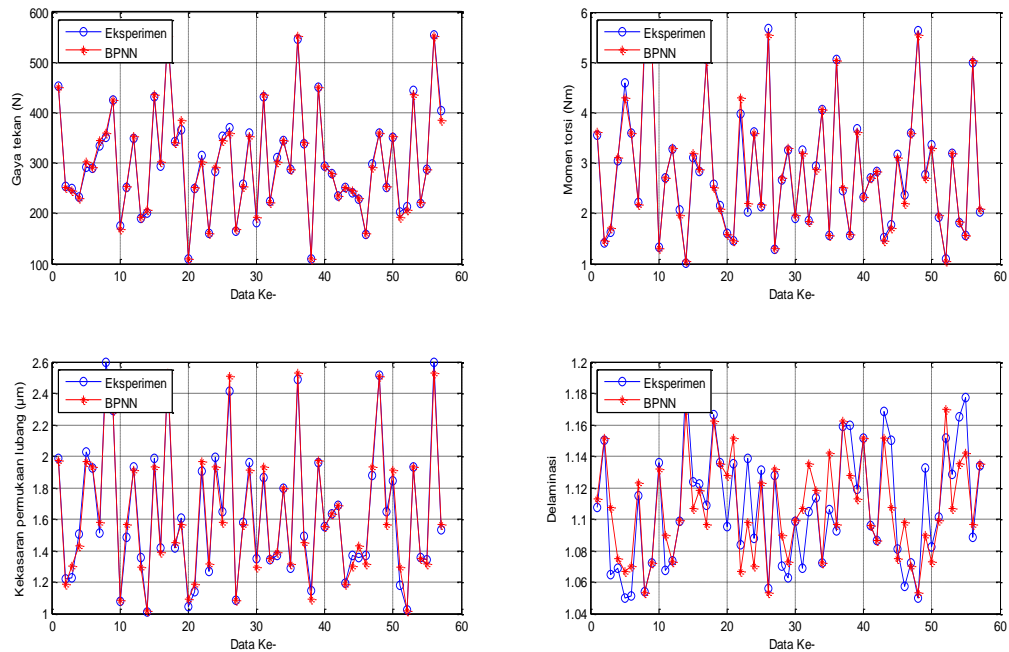
No	No.Data Training	Gaya Tekan			MomenTorsi			Kekasaran Permukaan			Delaminasi		
		Eks.	Prediksi	Error (%)	Eks.	Prediksi	Error (%)	Eks.	Prediksi	Error (%)	Eks.	Prediksi	Error (%)
1	1	451,80	451,55	0,06	3,559	3,620	-1,71	1,986	1,972	0,73	1,108	1,113	-0,51
2	5	254,50	251,67	1,11	1,416	1,459	-3,06	1,220	1,184	2,93	1,150	1,151	-0,11
3	6	249,20	245,30	1,57	1,631	1,705	-4,54	1,231	1,301	-5,77	1,065	1,108	-3,99
4	7	232,80	230,85	0,84	3,035	3,105	-2,31	1,502	1,428	4,90	1,069	1,075	-0,58
5	8	291,20	303,20	-4,12	4,594	4,285	6,73	2,025	1,966	2,91	1,050	1,067	-1,62
6	10	290,40	291,17	-0,26	3,591	3,601	-0,27	1,926	1,933	-0,35	1,051	1,070	-1,82
7	11	335,00	344,40	-2,81	2,225	2,174	2,29	1,512	1,580	-4,53	1,115	1,123	-0,73
8	12	350,30	360,20	-2,83	5,35	5,549	-3,73	2,595	2,506	3,41	1,054	1,053	0,04
9	13	424,60	424,60	0,00	5,331	5,331	0,00	2,291	2,291	0,00	1,073	1,072	0,00
10	14	175,50	169,60	3,36	1,334	1,308	1,95	1,080	1,083	-0,32	1,136	1,132	0,39
11	15	250,90	253,10	-0,88	2,708	2,715	-0,26	1,484	1,569	-5,75	1,068	1,090	-2,11
12	16	349,70	353,20	-1,00	3,28	3,302	-0,66	1,935	1,913	1,13	1,074	1,073	0,08
13	17	190,80	192,23	-0,75	2,074	1,968	5,09	1,358	1,297	4,48	1,099	1,100	-0,08
14	18	200,80	207,00	-3,09	1,006	1,049	-4,22	1,011	1,016	-0,55	1,189	1,170	1,58
15	19	431,70	435,77	-0,94	3,114	3,186	-2,30	1,986	1,929	2,84	1,124	1,107	1,48
16	21	293,10	301,50	-2,87	2,828	2,885	-2,00	1,414	1,393	1,51	1,123	1,118	0,39
17	24	555,90	552,37	0,64	5,067	5,037	0,59	2,501	2,528	-1,09	1,109	1,097	1,09
18	25	342,10	340,75	0,39	2,581	2,513	2,65	1,417	1,453	-2,54	1,166	1,162	0,32
19	26	365,70	384,60	-5,17	2,149	2,088	2,86	1,605	1,567	2,34	1,136	1,135	0,11
20	27	109,20	109,30	-0,09	1,597	1,574	1,44	1,043	1,093	-4,83	1,095	1,128	-2,97
21	32	249,50	251,67	-0,87	1,448	1,459	-0,78	1,140	1,184	-3,89	1,135	1,151	-1,43
22	35	315,20	303,20	3,81	3,976	4,285	-7,77	1,907	1,966	-3,09	1,084	1,067	1,57



Tabel 4.5 Data *Training* (lanjutan)

No	No.Data Training	Gaya Tekan			MomenTorsi			Kekasaran Permukaan			Delaminasi		
		Eks.	Prediksi	Error (%)	Eks.	Prediksi	Error (%)	Eks.	Prediksi	Error (%)	Eks.	Prediksi	Error (%)
23	36	160,40	159,50	0,56	2,018	2,197	-8,87	1,268	1,317	-3,89	1,139	1,098	3,57
24	37	284,20	291,17	-2,45	3,614	3,601	0,37	1,994	1,933	3,07	1,088	1,070	1,57
25	38	353,80	344,40	2,66	2,123	2,174	-2,40	1,649	1,580	4,16	1,131	1,123	0,72
26	39	370,20	360,20	2,70	5,666	5,549	2,06	2,411	2,506	-3,95	1,056	1,053	0,28
27	41	163,70	169,60	-3,60	1,282	1,308	-2,03	1,087	1,083	0,32	1,128	1,132	-0,39
28	42	257,50	253,10	1,71	2,672	2,715	-1,61	1,579	1,569	0,60	1,070	1,090	-1,87
29	43	358,60	353,20	1,51	3,261	3,302	-1,25	1,961	1,913	2,40	1,063	1,073	-0,98
30	44	182,50	192,23	-5,33	1,911	1,968	-3,00	1,352	1,297	4,09	1,099	1,100	-0,08
31	46	430,60	435,77	-1,20	3,248	3,186	1,92	1,867	1,929	-3,32	1,069	1,107	-3,59
32	47	224,10	222,25	0,83	1,855	1,840	0,81	1,342	1,349	-0,55	1,105	1,135	-2,71
33	48	309,90	301,50	2,71	2,941	2,885	1,92	1,371	1,393	-1,56	1,114	1,118	-0,39
34	49	344,90	344,90	0,00	4,064	4,064	0,00	1,796	1,795	0,00	1,073	1,072	0,00
35	50	286,60	286,85	-0,09	1,571	1,568	0,22	1,291	1,316	-1,94	1,106	1,142	-3,22
36	51	546,10	552,37	-1,15	5,055	5,037	0,36	2,490	2,528	-1,52	1,093	1,097	-0,38
37	52	339,40	340,75	-0,40	2,444	2,513	-2,80	1,489	1,453	2,42	1,159	1,162	-0,32
38	54	109,40	109,30	0,09	1,551	1,574	-1,48	1,144	1,093	4,40	1,160	1,128	2,80
39	55	451,30	451,55	-0,06	3,681	3,620	1,66	1,957	1,972	-0,74	1,119	1,113	0,50
40	56	293,60	293,60	0,00	2,328	2,328	0,00	1,554	1,554	0,00	1,151	1,151	0,00
41	57	280,00	280,00	0,00	2,699	2,699	0,00	1,631	1,631	0,00	1,096	1,096	0,00
42	58	234,10	234,10	0,00	2,824	2,824	0,00	1,689	1,689	0,00	1,086	1,086	0,00
43	59	251,00	251,67	-0,27	1,514	1,459	3,61	1,192	1,184	0,72	1,169	1,151	1,50
44	60	241,40	245,30	-1,62	1,779	1,705	4,16	1,373	1,301	5,17	1,150	1,108	3,70
45	61	228,90	230,85	-0,85	3,175	3,105	2,20	1,355	1,428	-5,43	1,081	1,075	0,58
46	63	158,60	159,50	-0,57	2,376	2,197	7,53	1,366	1,317	3,61	1,058	1,098	-3,84
47	64	298,90	291,17	2,59	3,597	3,601	-0,10	1,879	1,933	-2,90	1,073	1,070	0,19
48	66	360,10	360,20	-0,03	5,632	5,549	1,47	2,513	2,506	0,26	1,050	1,053	-0,32
49	69	250,90	253,10	-0,88	2,765	2,715	1,81	1,645	1,569	4,61	1,133	1,090	3,75
50	70	351,30	353,20	-0,54	3,364	3,302	1,85	1,845	1,913	-3,73	1,083	1,073	0,89
51	71	203,40	192,23	5,49	1,92	1,968	-2,52	1,181	1,297	-9,84	1,101	1,100	0,15
52	72	213,20	207,00	2,91	1,091	1,049	3,90	1,022	1,016	0,55	1,151	1,170	-1,63
53	73	445,00	435,77	2,07	3,195	3,186	0,29	1,935	1,929	0,29	1,129	1,107	1,92
54	74	220,40	222,25	-0,84	1,825	1,840	-0,82	1,356	1,349	0,55	1,165	1,135	2,58
55	77	287,10	286,85	0,09	1,564	1,568	-0,22	1,341	1,316	1,87	1,178	1,142	3,03
56	78	555,10	552,37	0,49	4,989	5,037	-0,96	2,593	2,528	2,51	1,089	1,097	-0,73
57	80	403,50	384,60	4,68	2,026	2,088	-3,04	1,530	1,567	-2,46	1,134	1,135	-0,11
rata-rata error				-0,05				-0,09				-0,10	-0,03

Sumber: Hasil Perhitungan



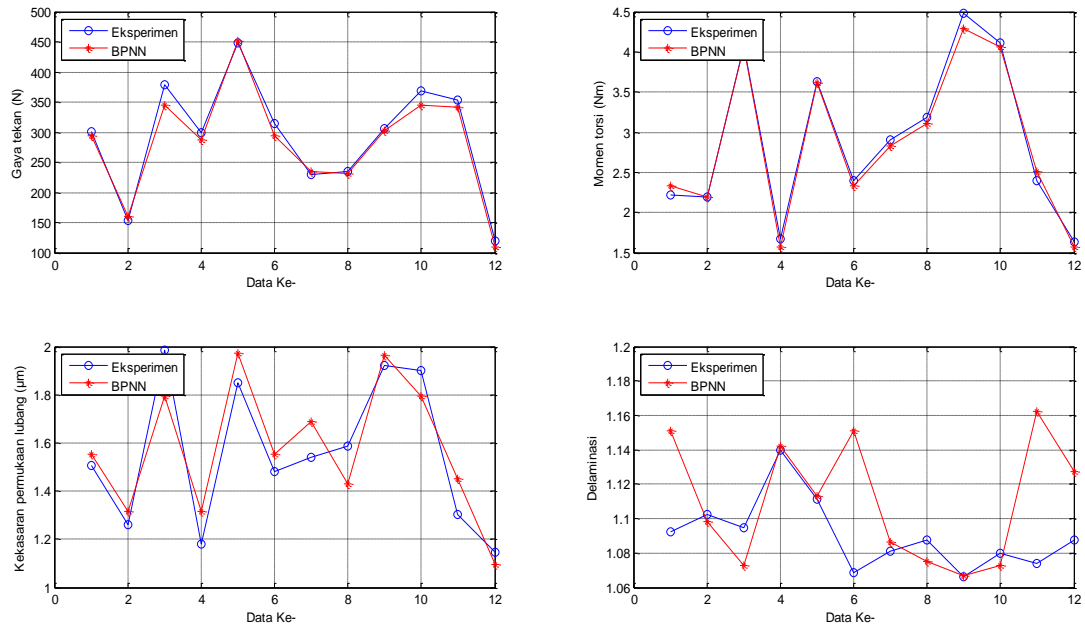
Gambar 4.4 Grafik Data Eksperimen dan *Output* Prediksi BPNN untuk Data *Training*.

Testing dilakukan dengan menggunakan 12 data seperti ditunjukkan pada Tabel 4.6. Gambar 4.5 menunjukkan grafik hasil eksperimen dan hasil prediksi BPNN untuk data *testing*.

Tabel 4.6 Data *Testing*

No	No.Data <i>Testing</i>	Gaya Tekan			MomenTorsi			Kekasaran Permukaan			Delaminasi		
		Eks.	Prediksi	Error (%)	Eks.	Prediksi	Error (%)	Eks.	Prediksi	Error (%)	Eks.	Prediksi	Error (%)
1	2	300,70	293,60	2,36	2,22	2,328	-4,86	1,506	1,554	-3,17	1,093	1,151	-5,38
2	9	152,60	159,50	-4,52	2,195	2,197	-0,09	1,262	1,317	-4,34	1,103	1,098	0,40
3	22	379,00	344,90	9,00	4,08	4,064	0,39	1,983	1,795	9,47	1,095	1,072	2,05
4	23	299,90	286,85	4,35	1,671	1,568	6,19	1,182	1,316	-11,41	1,140	1,142	-0,16
5	28	448,50	451,55	-0,68	3,625	3,620	0,14	1,850	1,972	-6,61	1,111	1,113	-0,17
6	29	314,40	293,60	6,62	2,39	2,328	2,59	1,480	1,554	-5,01	1,069	1,151	-7,72
7	31	230,20	234,10	-1,69	2,9	2,824	2,62	1,541	1,689	-9,62	1,081	1,086	-0,46
8	34	234,30	230,85	1,47	3,187	3,105	2,57	1,587	1,428	9,99	1,088	1,075	1,15
9	62	305,90	303,20	0,88	4,482	4,285	4,40	1,921	1,966	-2,33	1,066	1,067	-0,07
10	76	367,80	344,90	6,23	4,107	4,064	1,05	1,899	1,795	5,47	1,080	1,072	0,69
11	79	353,10	340,75	3,50	2,4	2,513	-4,69	1,302	1,453	-11,57	1,074	1,162	-8,27
12	81	118,80	109,30	8,00	1,633	1,574	3,61	1,148	1,093	4,76	1,088	1,128	-3,68
rata-rata error				2,96		1,16			-2,03			-1,80	

Sumber: Hasil Perhitungan



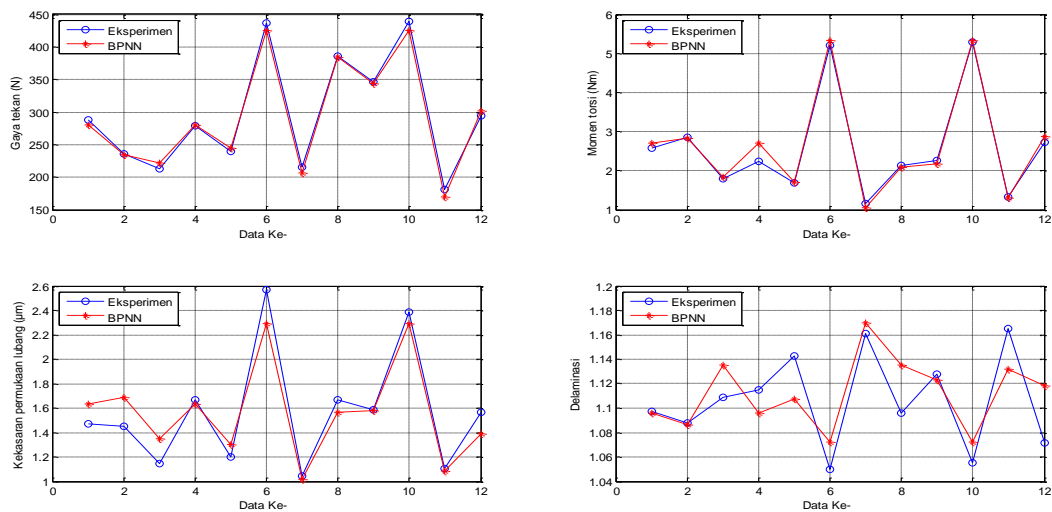
Gambar 4.5 Grafik Data Eksperimen dan *Output* Prediksi BPNN untuk Data *Testing*

Validasi dilakukan dengan menggunakan 12 data seperti ditunjukkan pada Tabel 4.7. Gambar 4.6 menunjukkan grafik hasil eksperimen dan hasil prediksi BPNN untuk data validasi.

Tabel 4.7 Data Validasi

No	No.Data Validasi	Gaya Tekan			MomenTorsi			Kekasaran Permukaan			Delaminasi		
		Eks.	Prediksi	Error (%)	Eks.	Prediksi	Error (%)	Eks.	Prediksi	Error (%)	Eks.	Prediksi	Error (%)
1	3	288,10	280,00	2,81	2,571	2,699	-4,98	1,471	1,631	-10,86	1,098	1,096	0,11
2	4	235,50	234,10	0,59	2,855	2,824	1,09	1,451	1,689	-16,42	1,088	1,086	0,11
3	20	212,40	222,25	-4,64	1,793	1,840	-2,62	1,149	1,349	-17,45	1,109	1,135	-2,37
4	30	279,20	280,00	-0,29	2,246	2,699	-20,17	1,665	1,631	2,05	1,115	1,096	1,68
5	33	240,00	245,30	-2,21	1,678	1,705	-1,61	1,197	1,301	-8,71	1,143	1,108	3,06
6	40	437,20	424,60	2,88	5,211	5,331	-2,30	2,568	2,291	10,78	1,050	1,072	-2,14
7	45	216,10	207,00	4,21	1,15	1,049	8,83	1,042	1,016	2,44	1,161	1,170	-0,75
8	53	385,80	384,60	0,31	2,143	2,088	2,59	1,665	1,567	5,85	1,096	1,135	-3,53
9	65	346,70	344,40	0,66	2,255	2,174	3,59	1,589	1,580	0,59	1,128	1,123	0,39
10	67	438,60	424,60	3,19	5,287	5,331	-0,83	2,387	2,291	4,01	1,055	1,072	-1,66
11	68	180,90	169,60	6,25	1,32	1,308	0,91	1,105	1,083	1,95	1,165	1,132	2,84
12	75	294,20	301,50	-2,48	2,721	2,885	-6,01	1,568	1,393	11,18	1,071	1,118	-4,38
rata-rata error				0,94									

Sumber: Hasil Perhitungan



Gambar 4.6 Grafik Data Eksperimen dan *Output* Prediksi BPNN untuk Data Validasi

Output data *testing* biasanya digunakan untuk melakukan pengujian error (selisih antara hasil eksperimen dengan hasil prediksi) dari BPNN. Tabel 4.6 menunjukkan data eksperimen dan *output testing* BPNN untuk respon gaya tekan, momen torsi, kekasaran permukaan lubang dan delaminasi. Nilai rata-rata error pada respon gaya tekan adalah sebesar 2,96 %. Nilai rata-rata error pada respon momen torsi adalah sebesar 1,16 %. Nilai rata-rata error pada respon kekasaran permukaan lubang adalah sebesar -2,03 % dan nilai rata-rata error pada respon delaminasi adalah sebesar -1,80 %. Nilai-nilai persen error tersebut memiliki nilai error negatif dan nilai error positif. Nilai error positif terjadi bila nilai hasil eksperimen lebih besar dari pada nilai hasil prediksi BPNN, sedangkan nilai error positif terjadi bila nilai hasil eksperimen lebih kecil dari pada nilai hasil prediksi BPNN. Persen error yang kecil menunjukkan bahwa prediksi yang dilakukan oleh BPNN sudah baik.

4.3 Metode Optimasi *Genetic Algorithm* (GA)

Proses prediksi respon dengan menggunakan BPNN telah selesai dilakukan dan didapatkan arsitektur jaringan yang menghasilkan MSE terkecil, dan langkah berikutnya adalah penentuan parameter GA. GA merupakan metode optimasi yang dapat digunakan untuk menentukan parameter-parameter proses yang



menghasilkan nilai respon yang optimum. Perhitungan untuk menentukan optimasi dengan GA dilakukan dengan menggunakan perangkat lunak Matlab seri R2013a. Berikut adalah langkah-langkah optimasi GA:

4.3.1 Penentuan Fungsi *Fitness*.

Fungsi *fitness* digunakan untuk mengukur tingkat kesesuaian suatu solusi dengan solusi yang dicari. Fungsi *fitness* bisa berhubungan langsung dengan fungsi tujuan, atau bisa juga dengan modifikasi terhadap suatu fungsi tujuan. Sejumlah solusi yang dibangkitkan dalam suatu populasi akan dievaluasi dengan menggunakan fungsi *fitness* (Santosa, 2011). Pada penelitian ini, fungsi *fitness* didapatkan dengan menggabungkan empat fungsi objektif (*objective function*) menjadi satu fungsi *fitness* (*fitness function*). Fungsi aktivasi yang digunakan untuk menentukan masing-masing fungsi objektif adalah *hyperbolic tangent sigmoid transfer function* (tansig). Rumus tansig yang digunakan adalah $\frac{2}{1+e^{-2x}}$ –

1. Fungsi objektif dari masing-masing respon didapatkan dengan menggunakan persamaan berikut:

$$Obj_l = \left(\sum_{j=1}^{13} w_{kl} \cdot \left(\left(\frac{2}{1+e^{-2zz}} \right) - 1 \right) \right) + w_{0l} \quad (4.2)$$

$$zz = \left(\sum_{j=1}^{13} v_{jk} \cdot \left(\left(\frac{2}{1+e^{-2z}} \right) - 1 \right) \right) + v_{0k} \quad (4.3)$$

$$z = \left(\sum_{j=1}^{15} (u_{ij} \cdot x_i) \right) + u_{0j} \quad (4.4)$$

Dengan:

Obj_l = Respon dari eksperimen, yaitu gaya tekan, momen torsi, kekasaran permukaan lubang dan delaminasi.

i = jumlah parameter proses

j = jumlah *neuron* pada hidden layer 1

k = jumlah *neuron* pada hidden layer 2

l = jumlah respon

u = nilai bobot dari *input layer* ke *hidden layer* 1.



v = nilai bobot dari dari *hidden layer* 1 ke *hidden layer* 2.

w = nilai bobot dari dari *hidden layer* 2 ke *output layer*.

u_0 = nilai bias dari dari *input layer* ke *hidden layer* 1.

v_0 = nilai bias dari dari *hidden layer* 1 ke *hidden layer* 2.

w_0 = nilai bias dari dari *hidden layer* 2 ke *output layer*.

z = nilai aktivasi masing-masing *neuron* pada *hidden layer* 1.

zz = nilai aktivasi masing-masing *neuron* pada *hidden layer* 2.

Setelah didapatkan fungsi objektif, maka dilakukan penggabungan empat fungsi objektif menjadi satu fungsi *fitness* seperti ditunjukkan persamaan berikut:

$$\text{minimize } f(x) = Obj_1 + Obj_2 + Obj_3 + Obj_4 \quad (4.5)$$

Dengan:

Obj_1 = gaya tekan.

Obj_2 = momen torsi.

Obj_3 = kekasaran permukaan lubang.

Obj_4 = delaminasi.

4.3.2 Penentuan Batas Atas dan Batas Bawah Parameter yang akan Dioptimasi.

Nilai optimal hasil optimasi yang diperoleh dengan metode GA perlu dibatasi agar tidak berada diluar nilai interval parameter proses. Tabel 4.8 menunjukkan nilai-nilai batas bawah dan batas atas interval dari parameter-parameter proses gurdi yang ingin dicapai.

Tabel 4.8 Nilai-Nilai Batas Bawah dan Batas Atas Parameter Proses.

Parameter Proses	Unit	Batas		
		Bawah	Tengah	Atas
Kecepatan spindel	rpm	600	1500	2400
Kecepatan makan	mm/menit	60	90	120
Sudut ujung pahat	derajat	118	130	140



4.3.3 Pengubahan Seting Hasil Optimasi Sudut Ujung Pahat berdasarkan Level.

Optimasi dengan menggunakan GA diharapkan menghasilkan nilai parameter-parameter optimal dari proses gurdi yang berupa bilangan interger, sehingga nilai hasil optimasi GA dapat diaplikasikan secara langsung pada mesin gurdi. Parameter-parameter kecepatan spindel, kecepatan makan, dan sudut ujung pahat memiliki batas atas dan batas bawah yang berupa bilangan integer. Sudut ujung pahat yang mempunyai nilai sebesar 118° , 130° dan 140° diubah berdasarkan level parameter yang mempunyai nilai sebesar 1, 2 dan 3 secara berurutan. Tabel 4.9 menunjukkan batas atas dan batas bawah interval dari parameter-parameter proses gurdi.

Tabel 4.9 Nilai-Nilai Batas Bawah dan Batas Atas setelah Pengubahan.

Parameter Proses	Unit	Batas		
		Bawah	Tengah	Atas
Kecepatan spindel	rpm	600	1500	2400
Kecepatan makan	mm/menit	60	90	120
Sudut ujung pahat	-	1	2	3

4.3.4 Penentuan Parameter-Parameter Optimasi GA:

Parameter-parameter yang digunakan pada optimasi GA adalah sebagai berikut:

- Jumlah populasi = 100.
- Jumlah generasi = 100.
- Proses seleksi dilakukan dengan menggunakan metode *roulette wheel*.
- Proses penyilangan dilakukan dengan menggunakan metode penyilangan dua titik (*crossover two point*) dengan probabilitas penyilangan sebesar 0,8.
- Proses mutasi dilakukan dengan menggunakan metode pemutasian seragam (*mutation uniform*) dengan probabilitas mutasi sebesar 0,05.
- Kriteria pemberhentian dilakukan pada generasi ke-100.



4.4 Hasil Optimasi GA

Penentuan parameter-parameter proses yang menghasilkan respon yang optimal dilakukan dengan beberapa kali percobaan. Hal ini disebabkan optimasi GA sering terjebak pada lokal optimum, sehingga harus dicari global optimum untuk mendapatkan seting parameter proses yang menghasilkan respon yang minimum. Tabel 4.10 menunjukkan seting parameter proses yang didapatkan dari optimasi GA dan respon yang diprediksi dengan menggunakan BPNN. Seting yang dipilih adalah seting yang menghasilkan respon yang paling kecil untuk ke empat respon.

Tabel 4.10 Hasil Seting Optimasi GA dan prediksi BPNN

Parameter Proses			Prediksi Respon			
Kecepatan Spindel	Kecepatan Makan	Sudut Ujung Pahat	Gaya Tekan (N)	Momen Torsi (Nm)	Kekasaran Permukaan (μm)	Delaminasi
2343	61	118	215,69	1,367	1,178	1,087

Sumber: Hasil Perhitungan

Optimasi multirespon dengan menggunakan metode GA menghasilkan kecepatan spindel sebesar 2343 rpm, kecepatan makan sebesar 61 mm/menit dan sudut ujung pahat sebesar 118°. Prediksi respon dengan menggunakan BPNN menghasilkan gaya tekan sebesar 215,69 N, momen torsi sebesar 1,367 Nm, kekasaran permukaan lubang sebesar 1,178 μm dan faktor delaminasi sebesar 1,087.

4.5 Eksperimen Konfirmasi

Eksperimen konfirmasi dilakukan untuk membandingkan hasil prediksi BPNN dengan hasil eksperimen. Eksperimen konfirmasi direplikasi sebanyak lima kali. Seting parameter proses pada eksperimen konfirmasi sesuai dengan hasil optimasi yang dilakukan dengan menggunakan metode GA seperti ditunjukkan pada Tabel 4.6, yaitu kecepatan spindel sebesar 2343 rpm, kecepatan makan sebesar 61 mm/menit dan sudut ujung pahat sebesar 118°. Pengukuran



gaya tekan, momen torsi, kekasaran permukaan lubang dan delaminasi dilakukan pada setiap replikasi. Hasil eksperimen konfirmasi dapat dilihat pada Tabel 4.11.

Tabel 4.11 Hasil Eksperimen Konfirmasi

Parameter Proses			Respon			
Kecepatan Spindel	Kecepatan Makan	Sudut Ujung Pahat	Gaya Tekan (N)	Momen Torsi (Nm)	Kekasaran Permukaan (μm)	Delaminasi
2343	61	118	218,45	1,355	1,053	1,090
			190,52	1,396	1,192	1,080
			216,65	1,211	1,126	1,099
			218,81	1,203	0,927	1,058
			196,85	1,385	0,955	1,056
Rata-rata			208,25	1,310	1,051	1,077

Sumber: Hasil Pengukuran

Data hasil eksperimen konfirmasi menunjukkan bahwa nilai rata-rata respon yang dapat dicapai adalah gaya tekan sebesar 208,25 N, momen torsi sebesar 1,310 Nm, kekasaran permukaan sebesar 1,051 μm dan faktor delaminasi sebesar 1,077.

4.6 Pengujian Kesamaan Rata-Rata Hasil Eksperimen Konfirmasi dengan Hasil Prediksi BPNN-GA.

Pengujian untuk kesamaan rata-rata antara hasil eksperimen konfirmasi dengan hasil prediksi BPNN-GA dilakukan dengan menggunakan uji rata-rata *one sample t-test*. Pengujian ini bertujuan untuk menguji apakah rata-rata nilai respon hasil eksperimen konfirmasi sama dengan nilai respon hasil prediksi BPNN-GA.

- Hipotesis pengujian *one sample t-test* untuk respon gaya tekan adalah:

$$H_0 : \mu = \mu_0$$

$$H_1 : \mu \neq \mu_0$$

$$\mu_0 = 215,69$$

- Kriteria penolakan adalah:

Tolak H_0 , jika nilai $P_{value} < \alpha$ dan $\alpha = 5\% = 0,05$

- Hasil: $P_{value} = 0,286$



- Kesimpulan: $P_{value} = 0,286 > 0,05$ yang berarti H_0 gagal ditolak, sehingga nilai rata-rata gaya tekan hasil eksperimen konfirmasi sama dengan nilai gaya tekan hasil prediksi BPNN-GA.
- Hipotesis pengujian *one sample t-test* untuk respon momen torsi adalah:
 - $H_0 : \mu = \mu_0$
 - $H_1 : \mu \neq \mu_0$
 - $\mu_0 = 1,367$
 - Kriteria penolakan adalah:
Tolak H_0 , jika nilai $P_{value} < \alpha$ dan $\alpha = 5\% = 0,05$
 - Hasil: $P_{value} = 0,252$
 - Kesimpulan: $P_{value} = 0,252 > 0,05$ yang berarti H_0 gagal ditolak sehingga nilai rata-rata momen torsi hasil eksperimen konfirmasi sama dengan nilai momen torsi hasil prediksi BPNN-GA.
- Hipotesis pengujian *one sample t-test* untuk respon kekasaran permukaan lubang adalah:
 - Hipotesis uji *one sample t-test* adalah:
 - $H_0 : \mu = \mu_0$
 - $H_1 : \mu \neq \mu_0$
 - $\mu_0 = 1,178$
 - Kriteria penolakan adalah:
 H_0 ditolak jika nilai $P_{value} < \alpha$ dan $\alpha = 5\% = 0,05$
 - Hasil: $P_{value} = 0,064$
 - Kesimpulan: $P_{value} = 0,064 > 0,05$ yang berarti H_0 gagal ditolak sehingga nilai rata-rata kekasaran permukaan lubang hasil eksperimen konfirmasi sama dengan nilai kekasaran permukaan lubang hasil prediksi BPNN-GA.
- Hipotesis pengujian *one sample t-test* untuk respon delaminasi adalah:
 - $H_0 : \mu = \mu_0$
 - $H_1 : \mu \neq \mu_0$
 - $\mu_0 = 1,087$
 - Kriteria penolakan adalah:



H_0 ditolak jika nilai $P_{value} < \alpha$ dan $\alpha = 5\% = 0,05$

- Hasil: $P_{value} = 0,291$
- Kesimpulan: $P_{value} = 0,291 > 0,05$ yang berarti H_0 gagal ditolak sehingga nilai rata-rata delaminasi hasil eksperimen konfirmasi sama dengan nilai delaminasi hasil prediksi BPNN-GA.

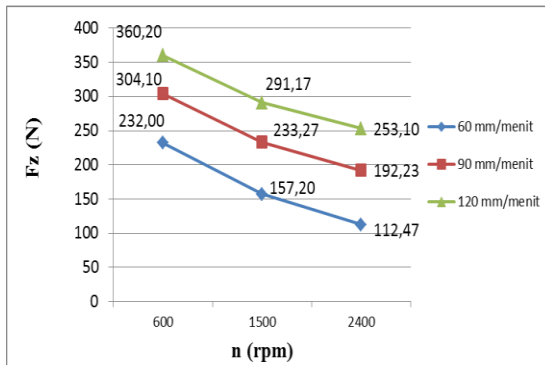
Berdasarkan pengujian *one sample t-test* untuk respon gaya tekan, momen torsi, kekasaran permukaan lubang dan delaminasi, dapat disimpulkan bahwa nilai prediksi hasil BPNN-GA sama dengan nilai rata-rata hasil eksperimen konfirmasi untuk semua respon.

4.7 Pengaruh Parameter Proses terhadap Parameter Respon

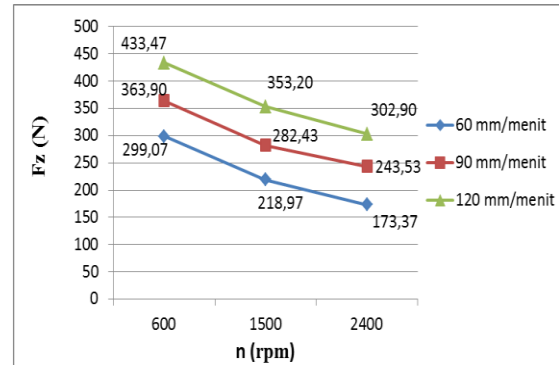
Data hasil eksperimen sesuai dengan rancangan percobaan faktorial $3 \times 3 \times 3$, ditunjukkan pada tabel 4.12. Pengaruh parameter-parameter proses terhadap masing-masing nilai respon dapat dijelaskan sebagai berikut.

4.7.1 Pengaruh Parameter Proses terhadap Gaya Tekan

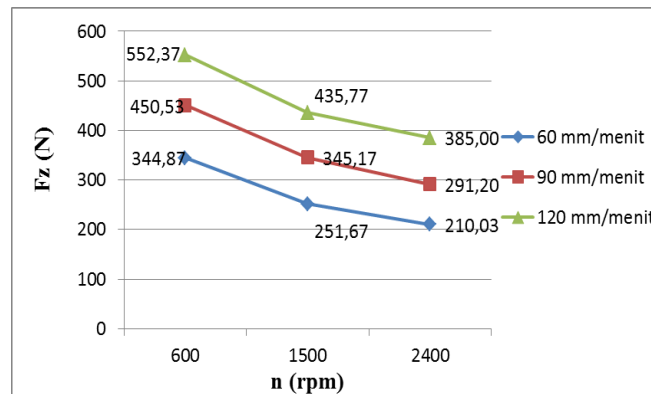
Pengaruh kecepatan spindel dengan variasi kecepatan makan terhadap gaya tekan pada material *stainless steel* ditunjukkan pada Gambar 4.7. Pada Gambar 4.7 (a) ditunjukkan bahwa peningkatan kecepatan spindel akan menurunkan gaya tekan pada penggurdian dengan menggunakan sudut ujung pahat sebesar 118° . Peningkatan kecepatan spindel juga akan menurunkan besarnya gaya tekan pada proses penggurdian dengan menggunakan sudut ujung pahat sebesar 130° dan 140° seperti ditunjukkan pada Gambar 4.7 (b) dan Gambar 4.7 (c) secara berurutan. Penelitian yang dilakukan Adem cicek dkk. (2012) tentang penggurdian *stainless steel* AISI 316 menunjukkan bahwa faktor yang berpengaruh terhadap gaya tekan adalah kecepatan potong, gerak makan dan jenis pahat. Penggunaan kecepatan spindel yang tinggi akan menurunkan gaya tekan pada proses penggurdian material *stainless steel*. Peningkatan kecepatan spindel akan meningkatkan gesekan antara pahat gudi dengan material *stainless steel*, sehingga meningkatkan temperatur pemotongan. Kenaikan dari temperatur pemotongan ini akan menyebabkan pelunakan terhadap material *stainlees steel* sehingga gaya tekan yang dihasilkan akan menurun.



(a)



(b)



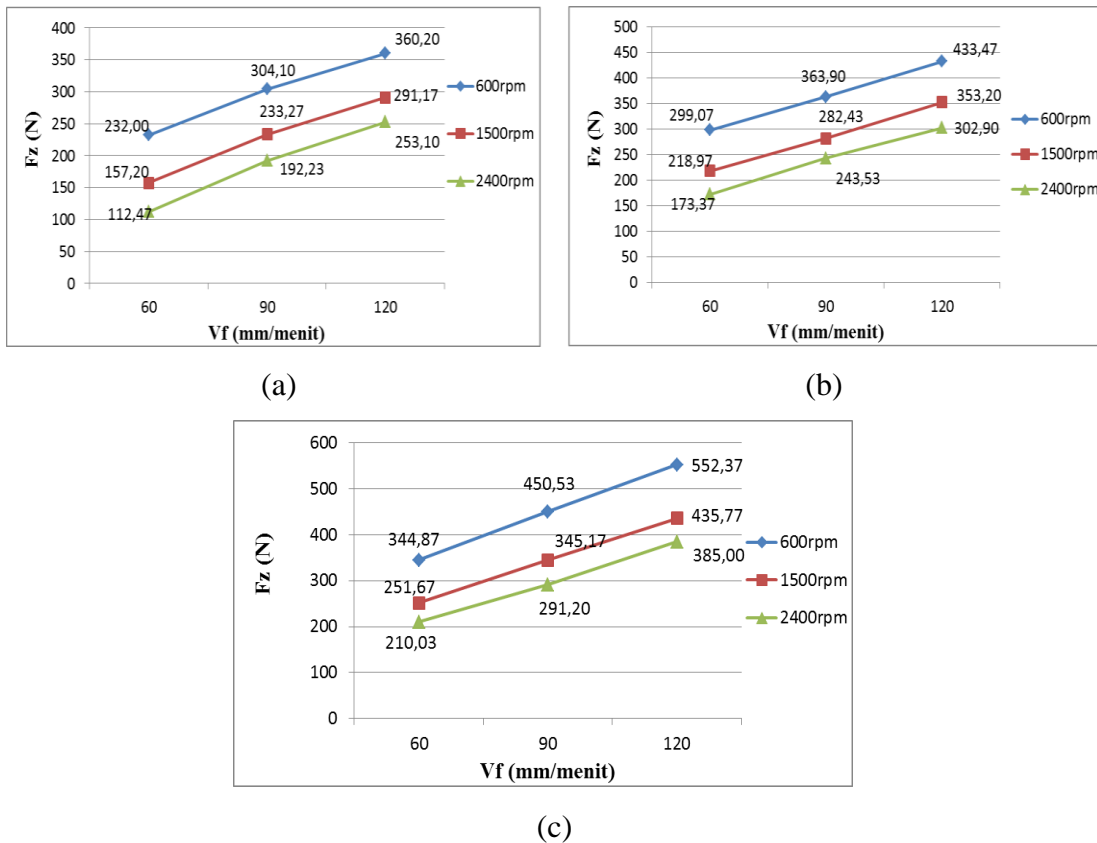
(c)

Gambar 4.7 Pengaruh Kecepatan Spindel terhadap Gaya Tekan dengan Variasi Kecepatan Makan untuk Sudut Ujung Pahat sebesar (a) 118° , (b) 130° , (c) 140° .

Pengaruh kecepatan makan dengan variasi kecepatan spindel terhadap gaya tekan ditunjukkan pada Gambar 4.8. Pada Gambar 4.8 ditunjukkan bahwa peningkatan kecepatan makan akan menaikkan gaya tekan pada proses penggurdian material GFRP-stainless steel stacks. Hal ini sesuai dengan persamaan empiris untuk menghitung gaya tekan yang terjadi selama proses penggurdian, yang menyatakan bahwa gaya tekan dipengaruhi oleh diameter pahat gundi dan kecepatan makan (Rochim, 1993). Fenomena ini berlaku untuk sudut ujung pahat 118° , 130° , dan 140° seperti ditunjukkan pada Gambar 4.8 (a), Gambar 4.8 (b) dan Gambar 4.8 (c) secara berurutan. Peningkatan sudut ujung pahat akan menaikkan gaya tekan. Semakin besar sudut ujung pahat yang digunakan, semakin besar gaya tekan yang dihasilkan. Armarego (1996)



menyatakan bahwa faktor yang berpengaruh terhadap gaya tekan pada proses penggurdian adalah sudut ujung pahat. Semakin besar sudut ujung pahat yang digunakan pada proses penggurdian, maka gaya tekan yang dihasilkan akan semakin besar.



Gambar 4.8 Pengaruh Kecepatan Makan terhadap Gaya Tekan dengan Variasi Kecepatan Spindel untuk Sudut Ujung Pahat (a) 118°, (b) 130°, (c) 140°.



Tabel 4.12 Data Hasil Eksperimen.

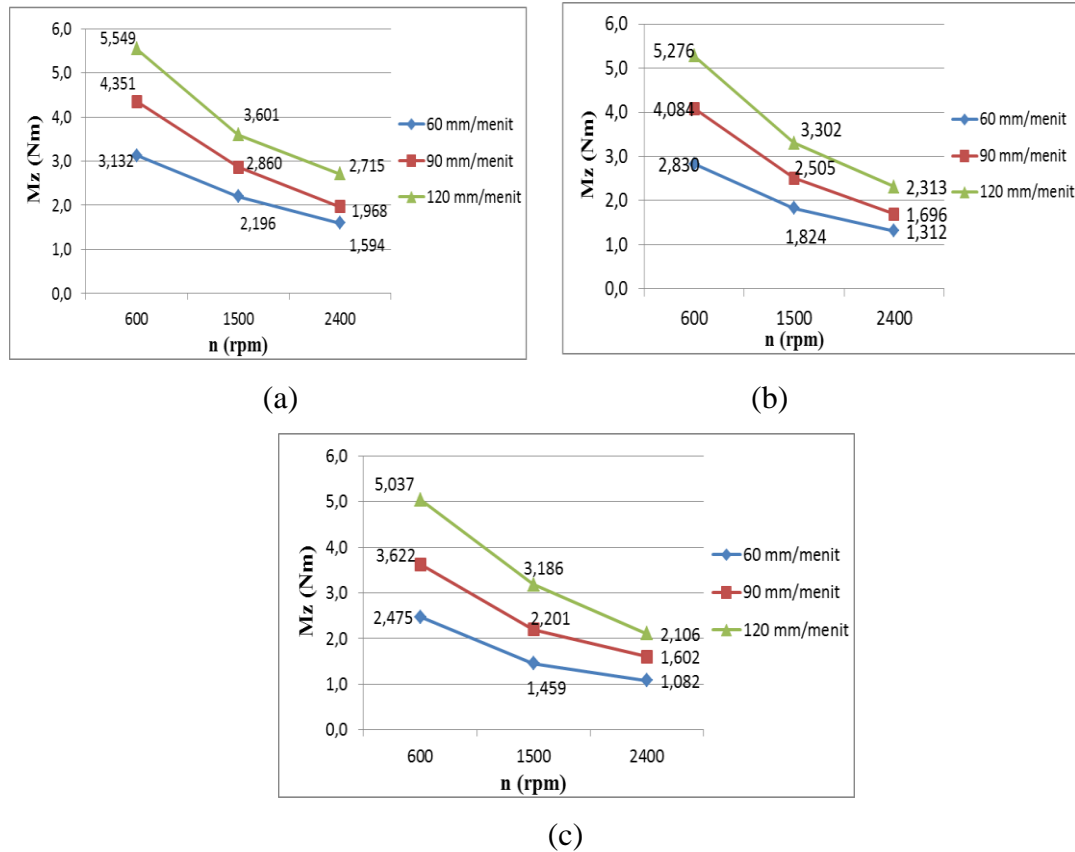
No	Kecepatan spindel	Kecepatan makan	Sudut ujung pahat	Gaya Tekan				Momen Torsi				Kekasaran Permukaan Lubang				Delaminasi			
				R1	R2	R3	rata-rata	R1	R2	R3	rata-rata	R1	R2	R3	rata-rata	R1	R2	R3	rata-rata
1	600	90	140	451,80	448,50	451,30	450,53	3,559	3,625	3,681	3,622	1,986	1,850	1,957	1,931	1,108	1,111	1,119	1,113
2	2400	120	130	300,70	314,40	293,60	302,90	2,220	2,390	2,328	2,313	1,506	1,480	1,554	1,513	1,093	1,069	1,151	1,104
3	1500	90	130	288,10	279,20	280,00	282,43	2,571	2,246	2,699	2,505	1,471	1,665	1,631	1,589	1,098	1,115	1,096	1,103
4	1500	90	118	235,50	230,20	234,10	233,27	2,855	2,900	2,824	2,860	1,451	1,541	1,689	1,560	1,088	1,081	1,086	1,085
5	1500	60	140	254,50	249,50	251,00	251,67	1,416	1,448	1,514	1,459	1,220	1,140	1,192	1,184	1,150	1,135	1,169	1,151
6	2400	90	130	249,20	240,00	241,40	243,53	1,631	1,678	1,779	1,696	1,231	1,197	1,373	1,267	1,065	1,143	1,150	1,119
7	600	60	118	232,80	234,30	228,90	232,00	3,035	3,187	3,175	3,132	1,502	1,587	1,355	1,481	1,069	1,088	1,081	1,079
8	600	90	118	291,20	315,20	305,90	304,10	4,594	3,976	4,482	4,351	2,025	1,907	1,921	1,951	1,050	1,084	1,066	1,067
9	1500	60	118	152,60	160,40	158,60	157,20	2,195	2,018	2,376	2,196	1,262	1,268	1,366	1,299	1,103	1,139	1,058	1,100
10	1500	120	118	290,40	284,20	298,90	291,17	3,591	3,614	3,597	3,601	1,926	1,994	1,879	1,933	1,051	1,088	1,073	1,070
11	1500	90	140	335,00	353,80	346,70	345,17	2,225	2,123	2,255	2,201	1,512	1,649	1,589	1,583	1,115	1,131	1,128	1,125
12	600	120	118	350,30	370,20	360,10	360,20	5,350	5,666	5,632	5,549	2,595	2,411	2,513	2,506	1,054	1,056	1,050	1,053
13	600	120	130	424,60	437,20	438,60	433,47	5,331	5,211	5,287	5,276	2,291	2,568	2,387	2,415	1,073	1,050	1,055	1,059
14	2400	60	130	175,50	163,70	180,90	173,37	1,334	1,282	1,320	1,312	1,080	1,087	1,105	1,090	1,136	1,128	1,165	1,143
15	2400	120	118	250,90	257,50	250,90	253,10	2,708	2,672	2,765	2,715	1,484	1,579	1,645	1,569	1,068	1,070	1,133	1,090
16	1500	120	130	349,70	358,60	351,30	353,20	3,280	3,261	3,364	3,302	1,935	1,961	1,845	1,913	1,074	1,063	1,083	1,073
17	2400	90	118	190,80	182,50	203,40	192,23	2,074	1,911	1,920	1,968	1,358	1,352	1,181	1,297	1,099	1,099	1,101	1,100
18	2400	60	140	200,80	216,10	213,20	210,03	1,006	1,150	1,091	1,082	1,011	1,042	1,022	1,025	1,189	1,161	1,151	1,167
19	1500	120	140	431,70	430,60	445,00	435,77	3,114	3,248	3,195	3,186	1,986	1,867	1,935	1,929	1,124	1,069	1,129	1,107
20	1500	60	130	212,40	224,10	220,40	218,97	1,793	1,855	1,825	1,824	1,149	1,342	1,356	1,282	1,109	1,105	1,165	1,126
21	600	60	130	293,10	309,90	294,20	299,07	2,828	2,941	2,721	2,830	1,414	1,371	1,568	1,451	1,123	1,114	1,071	1,103
22	600	90	130	379,00	344,90	367,80	363,90	4,080	4,064	4,107	4,084	1,983	1,796	1,899	1,893	1,095	1,073	1,080	1,083
23	2400	90	140	299,90	286,60	287,10	291,20	1,671	1,571	1,564	1,602	1,182	1,291	1,341	1,271	1,140	1,106	1,178	1,141
24	600	120	140	555,90	546,10	555,10	552,37	5,067	5,055	4,989	5,037	2,501	2,490	2,593	2,528	1,109	1,093	1,089	1,097
25	600	60	140	342,10	339,40	353,10	344,87	2,581	2,444	2,400	2,475	1,417	1,489	1,302	1,402	1,166	1,159	1,074	1,133
26	2400	120	140	365,70	385,80	403,50	385,00	2,149	2,143	2,026	2,106	1,605	1,665	1,530	1,600	1,136	1,096	1,134	1,122
27	2400	60	118	109,20	109,40	118,80	112,47	1,597	1,551	1,633	1,594	1,043	1,144	1,148	1,112	1,095	1,160	1,088	1,114

Sumber: Hasil Pengukuran



4.7.2 Pengaruh Parameter Proses terhadap Momen Torsi

Pengaruh kecepatan spindel dengan variasi kecepatan makan terhadap momen torsi ditunjukkan pada Gambar 4.9.

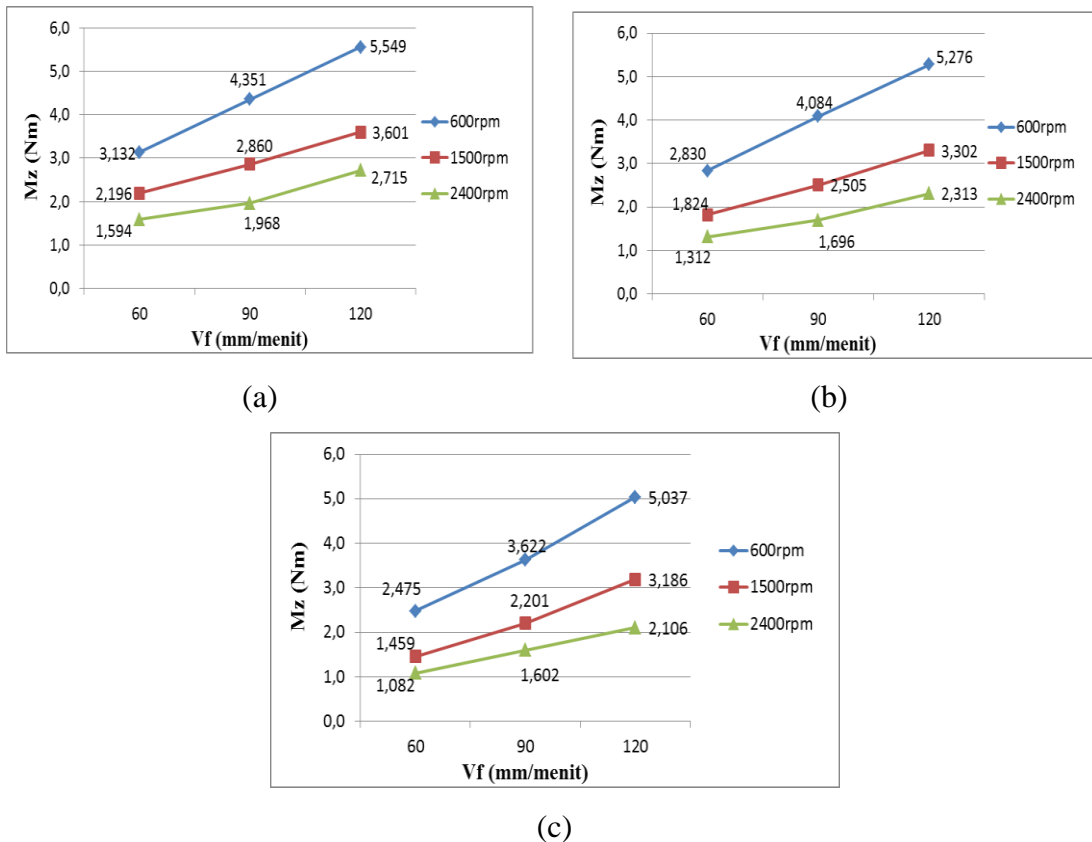


Gambar 4.9 Pengaruh Kecepatan Spindel terhadap Momen Torsi dengan Variasi Kecepatan Makan untuk Sudut Ujung Pahat (a) 118°, (b) 130°, (c) 140°.

Gambar 4.9 (a) menunjukkan bahwa peningkatan kecepatan spindel akan menurunkan nilai momen torsi. Hal ini terjadi karena peningkatan kecepatan spindel akan meningkatkan gesekan antara pahat gurdi dengan material, sehingga meningkatkan temperatur pemotongan. Peningkatan temperatur pemotongan ini akan menyebabkan pelunakan material sehingga momen torsi yang dihasilkan akan turun. Momen torsi pada proses penggurdian akan menurun dengan meningkatnya kecepatan spindel. Fenomena ini juga berlaku untuk sudut ujung pahat 118°, 130°, dan 140° seperti ditunjukkan pada Gambar 4.9 (a), Gambar 4.9 (b) dan Gambar 4.9 (c) secara berurutan.



Pengaruh kecepatan makan dengan variasi kecepatan spindle terhadap momen torsi ditunjukkan Gambar 4.10.



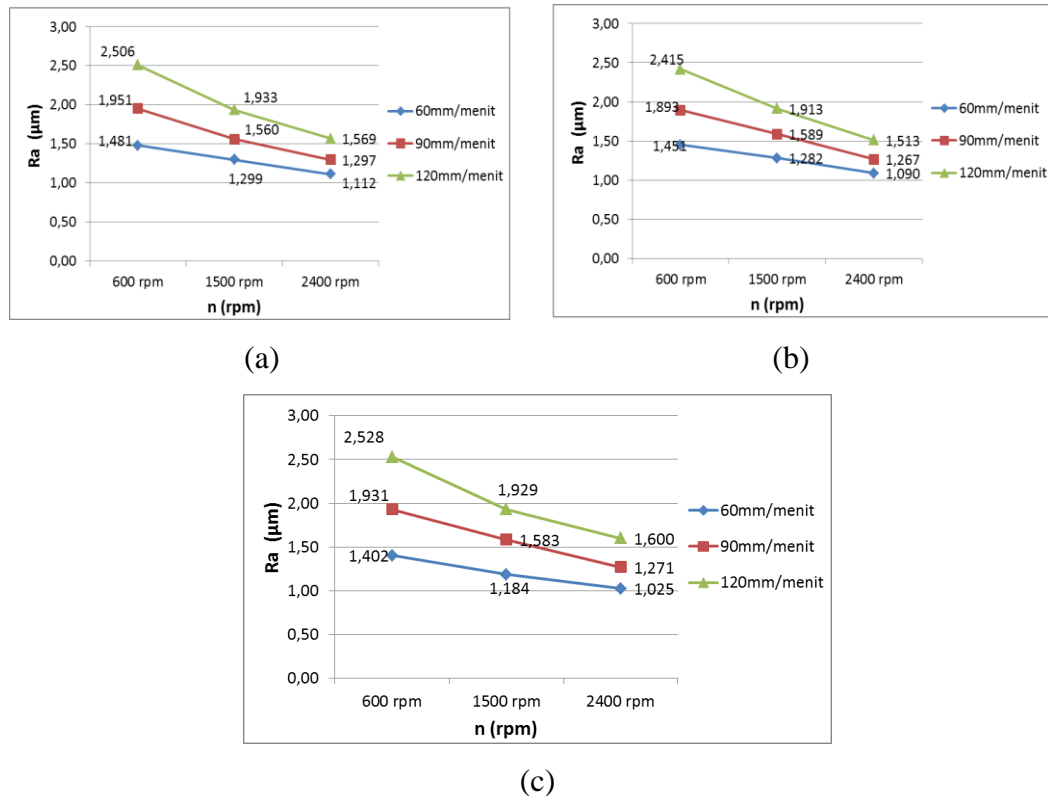
Gambar 4.10 Pengaruh Kecepatan Makan terhadap Momen Torsi dengan Variasi Kecepatan Spindel untuk Sudut Ujung Pahat (a) 118°, (b) 130°, (c) 140°.

Pada Gambar 4.10 ditunjukkan bahwa peningkatan kecepatan makan akan menaikkan nilai momen torsi pada penggurdian material GFRP-stainless steel stacks. Hal ini sesuai dengan persamaan empiris untuk menghitung momen torsi yang terjadi selama proses penggurdian, yang menyatakan bahwa nilai momen torsi dipengaruhi oleh diameter pahat gundi dan kecepatan makan (Rochim, 1993). Peningkatan sudut ujung pahat akan menurunkan nilai momen torsi. Semakin besar sudut ujung pahat, semakin kecil nilai momen torsi yang dihasilkan. Armarego (1996) menyatakan bahwa faktor yang berpengaruh terhadap momen torsi pada proses penggurdian adalah sudut ujung pahat. Semakin besar sudut ujung pahat yang digunakan pada proses penggurdian, maka momen torsi yang dihasilkan akan semakin kecil.



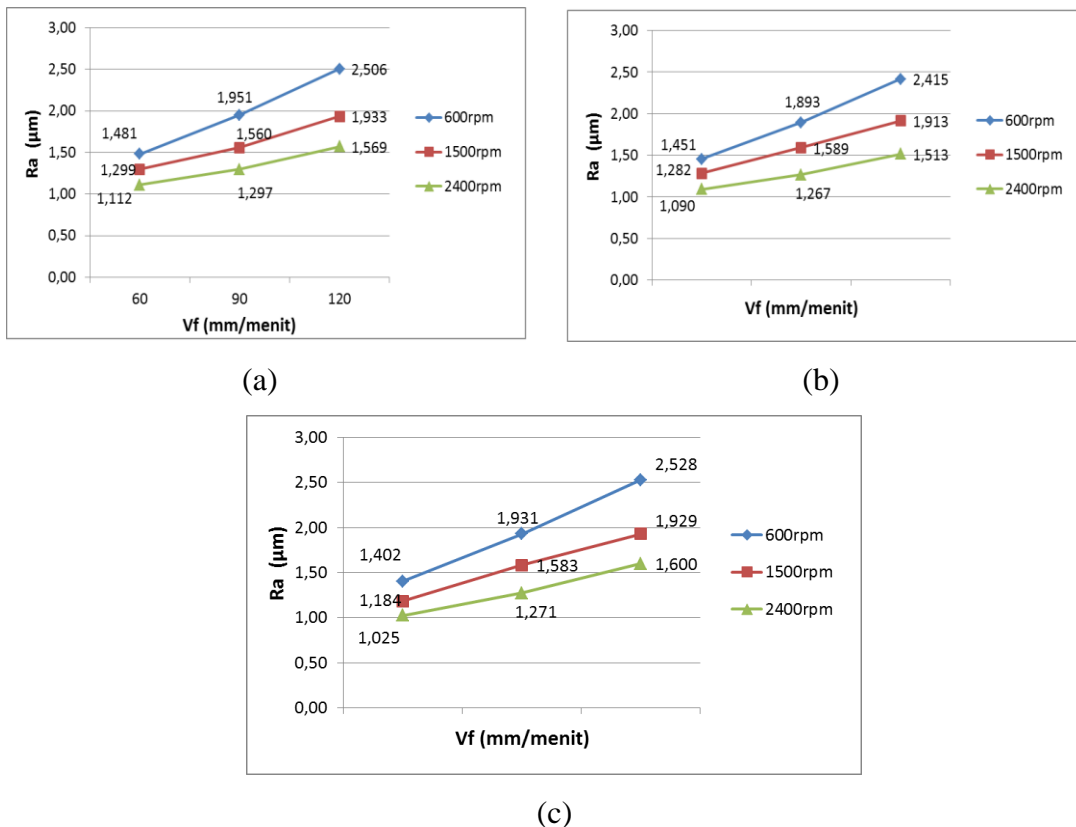
4.7.3 Pengaruh Parameter Proses terhadap Kekasaran Permukaan Lubang

Pengaruh kecepatan spindel dengan variasi kecepatan makan terhadap kekasaran permukaan lubang ditunjukkan pada Gambar 4.11.



Gambar 4.11 Pengaruh Kecepatan Spindel terhadap Kekasaran Permukaan Lubang dengan Variasi Kecepatan Makan untuk Sudut Ujung Pahat
(a) 118°, (b) 130°, (c) 140°.

Gambar 4.11 (a) menunjukkan bahwa peningkatan kecepatan spindel akan menurunkan kekasaran permukaan lubang. Fenomena ini juga berlaku untuk sudut ujung pahat 118°, 130°, dan 140° seperti ditunjukkan pada Gambar 4.11 (a), Gambar 4.11 (b) dan Gambar 4.11 (c) secara berurutan. Pengaruh kecepatan makan dengan variasi kecepatan spindel terhadap kekasaran permukaan lubang ditunjukkan pada Gambar 4.12.



Gambar 4.12 Pengaruh Kecepatan Makan terhadap Kekasaran Permukaan Lubang dengan Variasi Kecepatan Spindel untuk Sudut Ujung Pahat
(a) 118°, (b) 130°, (c) 140°.

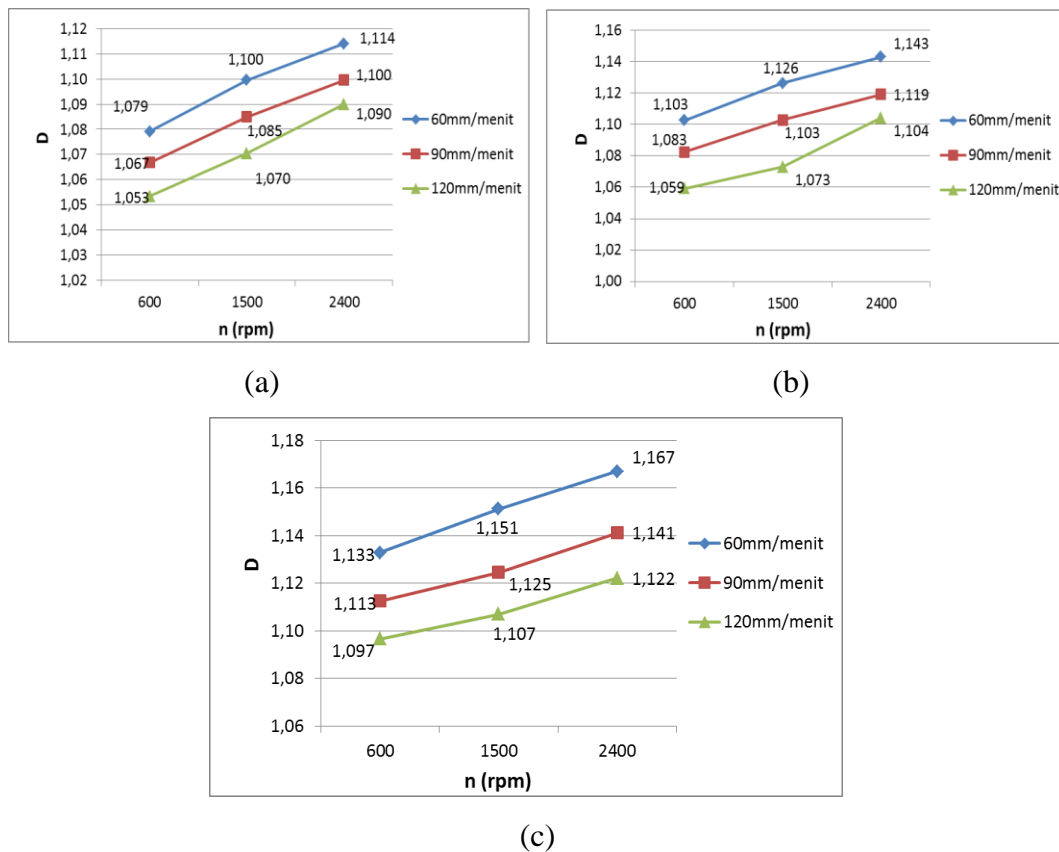
Gambar 4.12 (a) menunjukkan bahwa peningkatan kecepatan makan akan menaikkan kekasaran permukaan lubang. Fenomena ini juga berlaku untuk sudut ujung pahat 118°, 130°, dan 140° seperti ditunjukkan pada Gambar 4.12 (a), Gambar 4.12 (b) dan Gambar 4.12 (c) secara berurutan. Penelitian yang dilakukan oleh Davim dkk. (2004) tentang penggurdian pada material GFRP menunjukkan bahwa faktor yang paling berpengaruh terhadap respon kekasaran permukaan lubang adalah kecepatan spindel dan kecepatan makan. Kekasaran permukaan yang rendah dapat dicapai dengan kecepatan spindel yang tinggi dan kecepatan makan yang rendah. Penggunaan kecepatan spindel yang tinggi dan kecepatan makan yang rendah akan menyebabkan kenaikan temperatur pada material komposit yang dipotong. Kenaikan temperatur akan menurunkan kekerasan dari fasa penyusun komposit. Melunaknya fasa penyusun komposit akan memudahkan



material untuk terpotong, sehingga kekasaran permukaan yang dihasilkan juga semakin rendah.

4.7.4 Pengaruh Parameter Proses terhadap Delaminasi

Delaminasi sering ditemui pada penggurdian material GFRP. Hal ini disebabkan oleh kurang tepatnya pemilihan parameter proses pada proses gurdi. Penelitian ini menunjukkan bahwa faktor yang berpengaruh terhadap delaminasi secara berturut-turut adalah kecepatan makan, kecepatan spindel dan sudut ujung pahat. Pengaruh kecepatan spindel dengan variasi kecepatan makan terhadap delaminasi ditunjukkan pada Gambar 4.13.

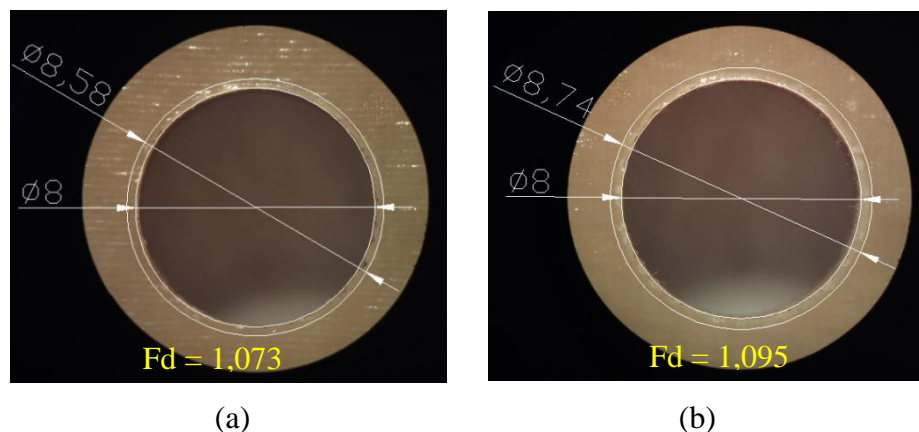


Gambar 4.13 Pengaruh Kecepatan Spindel terhadap Delaminasi dengan Variasi Kecepatan Makan untuk Sudut Ujung Pahat (a) 118°, (b) 130°, (c) 140°.

Gambar 4.13 (a) menunjukkan bahwa peningkatan kecepatan spindel akan meningkatkan delaminasi. Fenomena ini juga berlaku untuk sudut ujung pahat

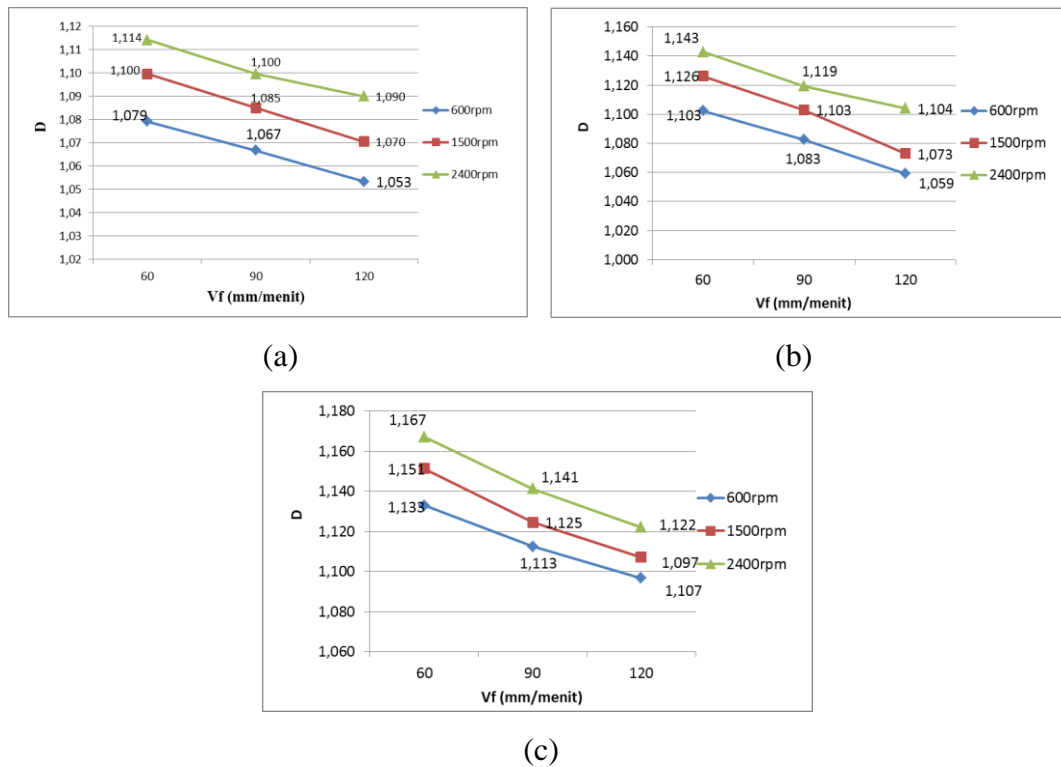


118°, 130°, dan 140° seperti ditunjukkan pada Gambar 4.13 (a), Gambar 4.13 (b) dan Gambar 4.13 (c) secara berurutan. Gambar 4.14 menunjukkan hasil pengukuran delaminasi pada bagian GFRP dengan variasi kecepatan spindel sebesar 600 dan 2400 rpm dengan kecepatan makan sebesar 120 mm/menit dan sudut ujung pahat sebesar 130°. Gambar 4.14 menunjukkan bahwa semakin tinggi kecepatan spindel, delaminasi yang terjadi akan semakin besar.

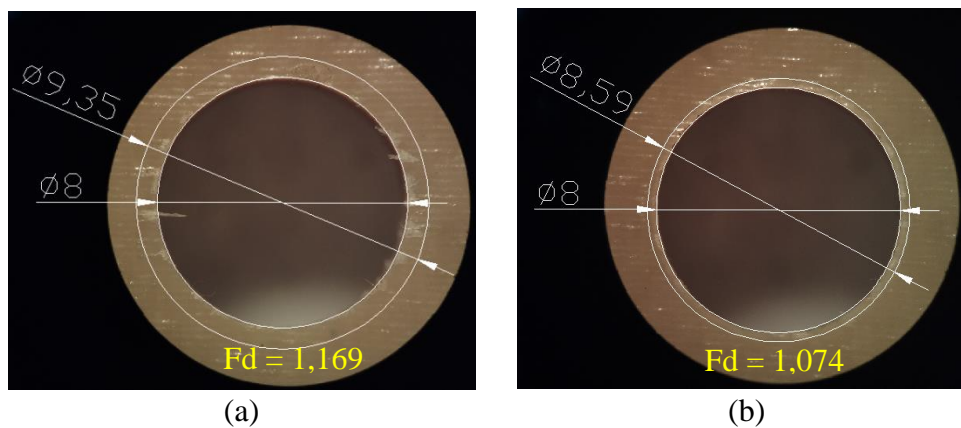


Gambar 4.14 Hasil Pengukuran Delaminasi (a) Kecepatan Spindel 600 rpm (b) Kecepatan Spindel 2400 rpm.

Pengaruh kecepatan makan dengan variasi kecepatan spindel terhadap delaminasi ditunjukkan pada Gambar 4.15. Gambar 4.15 (a) menunjukkan bahwa penggunaan kecepatan makan yang tinggi akan menurunkan delaminasi. Fenomena ini juga berlaku untuk sudut ujung pahat 118°, 130°, dan 140° seperti ditunjukkan pada Gambar 4.15 (a), Gambar 4.15 (b) dan Gambar 4.15 (c) secara berurutan. Gambar 4.16 menunjukkan hasil pengukuran delaminasi pada bagian GFRP dengan variasi kecepatan makan sebesar 60 dan 120 mm/menit dengan kecepatan spindel sebesar 1500 rpm dan sudut ujung pahat sebesar 130°. Gambar 4.16 menunjukkan bahwa semakin tinggi kecepatan makan, delaminasi yang terjadi semakin kecil.



Gambar 4.15 Pengaruh Kecepatan Makan terhadap Delaminasi dengan Variasi Kecepatan Spindel untuk Sudut Ujung Pahat (a) 118°, (b) 130°, (c) 140°.

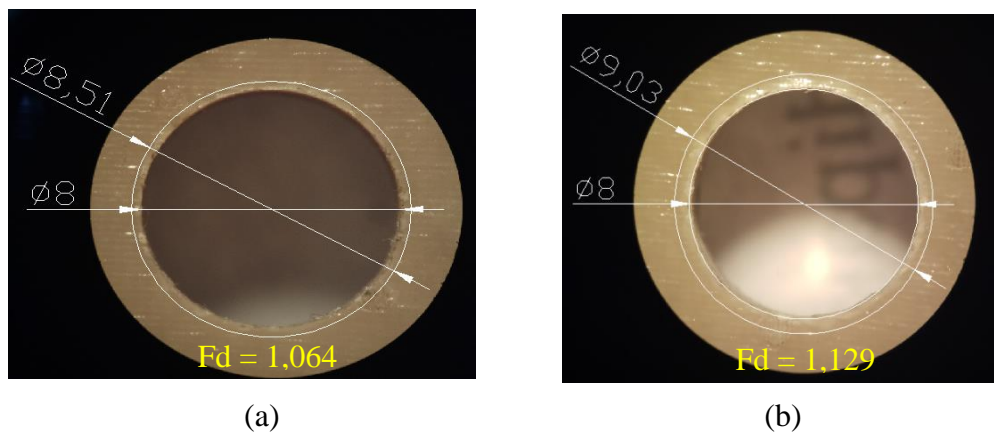


Gambar 4.16 Hasil Pengukuran Delaminasi (a) Kecepatan Makan 60 mm/menit (b) Kecepatan Makan 120 mm/menit.

Gambar 4.17 menunjukkan hasil pengukuran delaminasi pada bagian GFRP dengan variasi sudut ujung pahat sebesar 118° dan 140°, kecepatan spindel sebesar 600 rpm dan kecepatan makan sebesar 120 mm/menit. Gambar 4.17 menunjukkan bahwa kenaikan sudut ujung pahat, akan meningkatkan delaminasi yang terjadi. Hal ini terjadi karena peningkatan sudut ujung pahat akan menaikkan gaya tekan.



Armarego (1996) menyatakan bahwa faktor yang berpengaruh terhadap gaya tekan pada proses penggurdian adalah sudut ujung pahat. Semakin besar sudut ujung pahat yang digunakan pada proses penggurdian, maka gaya tekan yang dihasilkan akan semakin besar.



Gambar 4.17 Hasil Pengukuran Delaminasi (a) Sudut Ujung Pahat 118°
(b) Sudut Ujung Pahat 140°



[Halaman ini sengaja dikosongkan]



BAB 5

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil eksperimen dan proses optimasi yang telah dilakukan pada penelitian yang berjudul “Optimasi Multi Respon Proses Gurdi *Glass Fiber Reinforced Polymer* (GFRP)-*Stainless Steel Stacks* Dengan Metode *Backpropagation Neural Network–Genetic Algorithm* (BPNN-GA)” ini, dapat disimpulkan bahwa:

1. Arsitektur jaringan BPNN yang tepat untuk memprediksi respon gaya tekan, momen torsi, kekasaran permukaan lubang dan delaminasi pada proses gurdi material GFRP-*stainless steel stacks* adalah:
 - 3-13-13-4 yang memiliki arti jaringan terdiri dari 3 *input layer*, 2 *hidden layer* dengan 13 *neuron* pada masing-masing *hidden layer* dan 4 *output layer*.
 - Nilai *mean square error* (MSE) antara hasil eksperimen dengan hasil prediksi BPNN adalah 0,0361.
2. Pengaturan parameter-parameter proses gurdi dengan menggunakan *genetic algorithm* (GA) yang dapat meminimumkan respon gaya tekan, momen torsi, kekasaran permukaan lubang dan delaminasi secara serentak pada penggurdian material GFRP-*stainless steel stacks* adalah
 - Kecepatan spindel sebesar 2343 rpm.
 - Kecepatan makan sebesar 61 mm/menit.
 - Sudut ujung pahat sebesar 118°.

5.2 Saran

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan, saran yang dapat diberikan untuk penelitian selanjutnya adalah sebagai berikut:

1. Proses penggurdian untuk optimasi multirespon material GFRP-*stainless steel stacks* dilakukan dengan posisi dari GFRP berada diatas.



2. Pengambilan gambar delaminasi dapat dilakukan dengan menggunakan mikroskop makro yang dilengkapi dengan kamera yang langsung terintegrasi dengan perangkat komputer, sehingga gambar delaminasi dapat terlihat dengan jelas.



DAFTAR PUSTAKA

- Armarago, E., J., A., *Material Removal Processes-Twist Drills and Drilling Operation*, The University of Melbourne, Melbourne.
- Basuki, A., (2003), *Strategi Menggunakan Algoritma Genetika*, Politeknik Elektronika Negeri Surabaya, Surabaya.
- Callister, W. D., (2007), *Material Science and Engineering: An Introduction*, John Willey and Sons Inc., United States of America.
- Cheng, J., Liu, Z., dan Tan, J., (2012), “Multiobjective Optimization of Injection Molding Parameters Based on Soft Computing and Variable Complexity Method,” *Advance Manufacture Technology*, Vol. 58, hal. 4376-4385.
- Davim, J.P., Reis, P. dan Antonio, C.C. (2004), Experimental Study of Drilling Glass Fiber Reinforced Plastics (GFRP) Manufactured By Hand Lay-Up,” *Composites Science and Technology*, Vol. 64, hal. 289–297.
- Gaitonde, V. N., Karnik, S. R., dan Davim, J. P., (2007), “Taguchi Multiple Performance Characteristics Optimization in Drilling of Medium Density Fibreboard (MDF) to Minimize Delamination using Utility Concept,” *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 196, hal. 73-78.
- Gay, D., Hoa, S. V., Tsai, S. W., (2003), *Composite Materials Design and Applications*, New York, CRC Press.
- Hayajneh, M. T., Hassan, A. M., Mayyas, A. T., dan Alrash, A., (2011), “Modeling of Drilling Process of Al-Mg-Cu Alloys and Al-Mg-Cu/SiC Composite using Artificial Neuron Network,” *Journal of Science and Technology*, Vol. 1, hal. 18-24.
- Juhana, O., dan Suratman, M., (2000), *Menggambar Teknik Mesin dengan Standar ISO*, Pustaka Grafika, Bandung.
- Jones, P. M., (1975), *Mechanics of Composite Materials*, Scripta Book Company, Washington DC.
- Kalpakjian, S., Schmid S. R., (2009), *Manufacturing Engineering and Technology*, 6th edition.
- McGuire, M. F., (2008), *Stainless Steel For Design Engineers*, ASM International, United States of America.



- Montgomery, D. C., (2009), *Design and Analysis of Experiment*, John Wiley and Sons, Inc., New York.
- Mouritz, A., (2012), *Introduction to Aerospace Materials*. Elsevier.
- Nagaraja, Herbert, M. A., Shetty, D., dan Shivamurthy, B., (2013), "Effect of Process Parameters on Delamination, Thrust Force, and Torque in Drilling of Carbon Fiber Epoxy Composite," *Research Journal of Recent Sciences*, Vol. 2, No. 8, hal. 47-51.
- Palanikumar, K., Prakash, S., dan Shanmugam, K., (2008), "Evaluation of Delamination in Drilling GFRP Composites," *Materials and Manufacturing Process*, Vol. 23, No. 8, hal. 858-864.
- Palanikumar, K., (2012), "Experimental Investigation and Optimization in Drilling of GFRP Composites," *Original Research Article Measurement*, Vol. 44, hal. 2138-2148.
- Park, K. H., Aaron, B., Dave, K., Patrick, dan Jeff, L., (2011), "Tool Wear in Drilling of Composite/Titanium Stacks using Carbide and Polycrystalline Diamond Tools," *Original Research Article Wear*, Vol. 271, hal. 2826-2835.
- Razfar, M. R., dan Zadeh, Z. M., (2009), "Optimum Damage and Surface Roughness Prediction in End Milling Glass Fibre-Reinforced Plastics using Neural Network and Genetic Algorithm," *Engineering Manufacture Process*, Vol. 223, No. 6, hal. 653-664.
- Rong, Y., Zhang, Z., Zhang, G., Yue, C., Yu, H., Wang, C., Xinyu, S., (2015), "Paramaters Optimization of Laser Brazing in Crimping Butt using Taguchi and BPNN-GA," *Optics and Laser in Engineering*, Vol. 67, Hal. 94-104.
- Ross, P. J., (2008), *Taguchi Techniques for Quality Engineering*, McGraw Hill Companies Inc., Taiwan.
- Rochim, T., (1993), *Proses Pemesinan*, Institut Teknologi Bandung, Bandung.
- Rochim, T., (2001), *Spesifikasi, Metrologi dan Kontrol Kualitas Geometrik*, Lab. Metrologi Industri, Departemen Teknik Mesin FTI-ITB, Bandung.
- Routio, M., Saynatjoki, M., (1995), "Tool Wear and Failure in Drilling of Stainless Steel" *Journal of material Processing Technology*, Vol. 5. hal. 35-43.



- Santosa, B., dan Willy, P., (2011), “*Metoda Metaheuristik: Konsep dan Implementasi*”, Guna Widya, Surabaya.
- Schwartz, W. F., (1986), *Composite Materials Handbook*, McGraw Hill Inc., New York.
- Shyha, I., Soo, S., Perry, R., Bradley, S., (2010), “Hole Quality Assessment Following Drilling of Metallic Composite Stack,” *Machining Tools Manufacturing*, Vol. 51. hal. 569-578.
- Siang, J. J., (2009), *Jaringan Syaraf Tiruan dan Pemrogramannya Menggunakan MATLAB*, Andi Offset, Yogyakarta.
- Soejanto, I., (2009), *Desain Eksperimen dengan Metode Taguchi*, Graha Ilmu, Yogyakarta.
- Tsao, C. C., (2008), “Experimental study of drilling composite materials with step core drill.” *Materials and Design*, Vol. 29, hal. 1740-1744.
- Tzeng, C. J., Chen, R., Y., (2013), “Optimization of Electrical Discharge Machining Process using the Response Surface Methodology and Genetic Algorithm Approach,” *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, Vol. 14, No. 5, hal. 709-717.
- Tzeng, C. J., Yang, Y. K., Hsieh, M. H., and Jeng, M. C., (2011), “Optimization of Wire Electrical Discharge Machining of Pure Tungsten Using Neural Network and Response Surface Methodology,” *Journal of Engineering Manufacture*, Vol. 225, No. 6, hal. 841-852.
- Vankanti, V. K., dan Ganta, V. K., (2013), “Optimization of Process Parameters in Drilling of GFRP Composite Using Taguchi Method,” *Journal of Materials Research and Technology*, Vol. 3, No. 1, hal. 35-41.
- Yin, F., Mao, H., Hua, L., (2011), “A hybrid of Backpropagation Neural Network and Genetic Algorithm for Optimization of Injection Molding Process Parameters”, *Material and Design*. Vol. 32, hal. 3457-3464.



[Halaman ini sengaja dikosongkan]



LAMPIRAN

Lampiran A

Mechanical properties material stainless steel AMS 5528.



Stainless 17-7 PH

Type 17-7 PH Precipitation-Hardening Stainless Steel in sheet and strip forms provide valuable property combinations particularly well suited for aerospace applications. This special alloy also provides benefits for other applications requiring high strength and good corrosion resistance, as well as excellent properties for flat springs up to 600°F (316°C). 17-7PH provides high strength and hardness, excellent fatigue properties, good corrosion resistance and minimum distortion on heat treatment.

Specifications
AMS: 5528, 5529, 5568, 5644, 5678
ASTM: A313, A564, A579, A693, A705
UNS: S17700

Chemical Composition, %

	Cr	Mn	Si	Ni	P	S	C	Al
MIN	16.00	—	—	6.50	—	—	—	0.75
MAX	18.00	1.00	1.00	7.75	0.04	0.03	0.09	1.50

Resistance to Corrosion: Corrosion resistance of Type 17-7PH stainless steel in all heat-treated conditions, like other types of stainless steels – will develop superficial rust in some environments. However, after exposure of one or two years, the amount of rust present is little more than that present at six months. It may be subject to cracking when exposed under stress in environments containing hydrogen sulfide

Physical Properties

Melting Range: 2560-2625°F (1404-1440°C)
Density: 0.2820 lb/in³

Linear Coefficient of Thermal Expansion

Temperature Range		Coefficients	
°C	°F	µm/m·°C	in/in/°F·106
21-93	70-200	15.3	8.5
21-204	70-400	16.2	9.0
21-316	70-600	17.1	9.5
21-427	70-800	17.3	9.6

Thermal Conductivity

Temperature Range			
°C	°F	W/m·K	Btu/(hr/ft ² /in/°F)
149	300	16.87	117
260	500	18.46	128
449	840	21.05	146
482	900	21.05	146

Mechanical Properties

Typical Mechanical Properties Room Temperature (Annealed)

UTS (Tensile) Ksi(Mpa)	.02% Yield Strength Ksi(Mpa)	Elongation % in 2" (51mm)	Hardness Rockwell C
130,000 (896)	40,000 (276)	35	B85



Lampiran B

Tabel L.1 Nilai-nilai bobot dan bias BPNN, (a) nilai bobot dan bias dari *input layer* ke *hidden layer 1*, (b) nilai bobot dan bias dari *hidden layer 1* ke *hidden layer 2* (c) nilai bobot dan bias dari *hidden layer 2* ke *output layer*

Neuron	(a) Nilai bobot dan nilai bias dari <i>input layer</i> ke <i>hidden layer 1</i>			
	Bobot			Bias
	1	2	3	
1	2,636	-1,930	-0,409	-3,224
2	-2,658	2,015	-0,272	2,654
3	1,375	1,425	-2,901	-2,420
4	-0,428	-2,019	2,039	1,896
5	2,019	2,519	0,057	-0,933
6	0,154	-1,490	-3,021	0,517
7	1,065	2,386	2,020	-0,088
8	2,393	-1,708	0,989	0,815
9	-2,551	2,177	-0,270	-0,781
10	2,096	3,054	0,103	1,114
11	-0,951	-2,495	-2,090	-2,018
12	-1,856	-1,284	2,561	-2,827
13	-1,989	-2,138	-1,771	-3,146

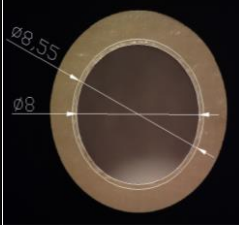
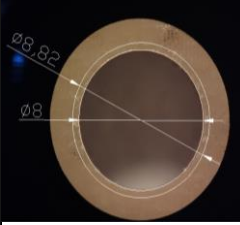
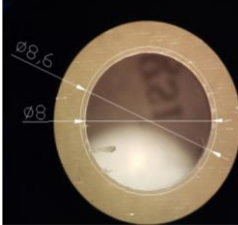
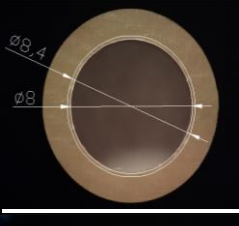
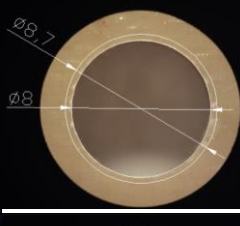
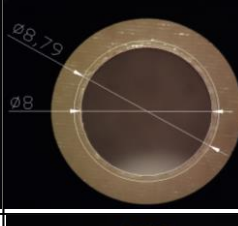
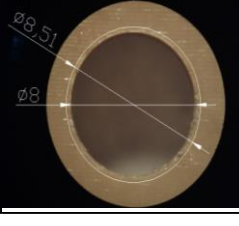
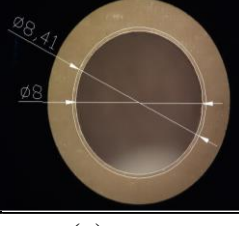
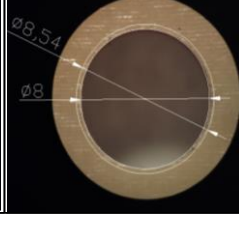
Neuron	(a) Nilai bobot dan nilai bias dari <i>hidden layer 1</i> ke <i>hidden layer 2</i>													
	Bobot													Bias
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	
1	-0,133	-0,452	-0,515	-0,620	-0,452	-0,117	-0,585	-0,519	0,876	0,587	-0,470	0,343	0,073	-1,658
2	0,118	0,776	-0,800	0,603	-0,357	0,501	-0,734	0,514	-0,762	0,715	-0,354	-0,263	0,114	-1,365
3	0,123	0,442	-0,598	0,348	0,295	-0,266	0,420	0,056	0,098	0,594	-0,237	0,259	-0,062	1,266
4	-0,885	0,060	0,228	0,010	0,869	0,386	0,218	0,330	-0,114	0,133	-0,416	-0,345	-0,569	0,868
5	-0,336	-0,218	-0,722	0,017	-0,130	0,685	0,181	0,283	0,133	-0,052	0,524	0,436	-0,099	0,424
6	-0,254	-0,703	0,836	0,651	-0,754	0,128	-0,270	-0,566	0,430	0,342	0,811	0,837	0,197	0,247
7	-1,084	-0,767	0,380	-0,462	-0,498	-0,188	-0,789	0,240	0,597	1,059	-0,140	-0,754	0,791	0,126
8	0,729	-0,485	0,011	0,419	0,417	-0,074	-0,319	-0,081	-0,044	-0,418	-0,303	-0,372	0,522	0,253
9	-0,614	0,382	0,310	0,662	-0,060	-0,551	-0,770	0,104	-0,276	0,074	0,038	-0,672	0,477	-0,385
10	-0,084	0,475	-0,068	0,588	-0,141	0,257	0,320	0,684	0,444	-0,306	-0,133	-0,707	-0,397	-0,765
11	0,953	0,073	0,053	0,099	0,083	0,266	-0,431	-0,274	0,033	0,686	-0,629	-0,217	0,877	0,923
12	-0,608	-0,581	-0,994	0,117	0,208	0,136	-0,302	0,868	0,244	-0,307	-0,587	-0,858	-0,234	-1,414
13	-0,513	-0,301	0,674	-0,735	-0,289	-0,216	0,394	-0,636	-0,439	-0,481	-0,890	-0,609	-0,893	-1,460

Neuron	(a) Nilai bobot dan nilai bias dari <i>hidden layer 2</i> ke <i>output layer</i>													
	Bobot													Bias
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	
1	0,455	-0,125	0,853	0,126	-0,569	0,056	-0,059	-0,018	0,191	0,516	-0,061	-0,438	-0,643	-0,793
2	0,632	-0,690	0,376	0,043	0,522	-0,591	-0,501	0,219	1,219	0,555	0,704	-0,925	0,035	-0,896
3	0,878	-0,073	0,160	-0,250	-0,296	-0,153	0,183	-0,342	-0,009	0,518	0,031	-0,287	-0,489	-0,011
4	-0,152	0,244	-0,163	0,081	-0,018	-0,138	-0,572	-0,101	-0,163	-0,008	0,268	-0,032	-0,095	-0,375

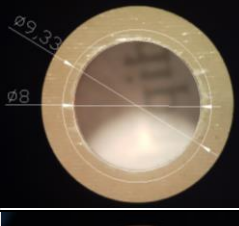
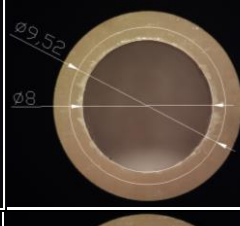
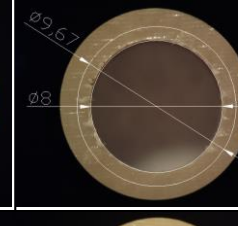
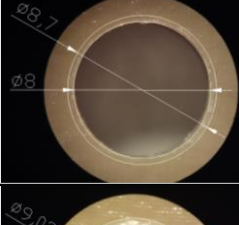
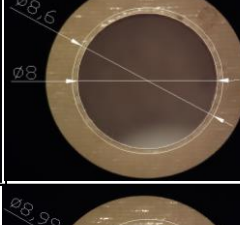
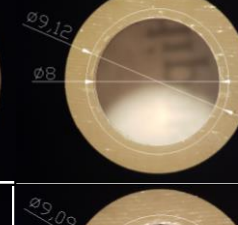
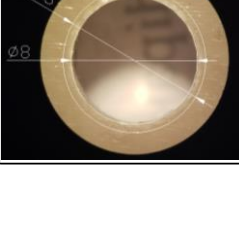
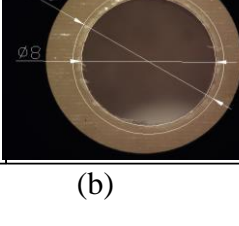
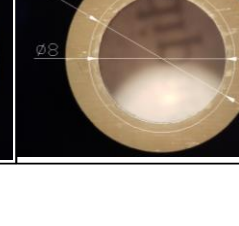


Lampiran C

Tabel L.2 Delaminasi Lubang keluar untuk (a) Sudut ujung pahat 118° , (b) Sudut ujung pahat 140°

		Kecepatan spindel		
		600 rpm	1500 rpm	2400 rpm
Kecepatan makan	60 mm/menit			
	90 mm/menit			
	120 mm/menit			

(a)

		Kecepatan spindel		
		600 rpm	1500 rpm	2400 rpm
Kecepatan makan	60 mm/menit			
	90 mm/menit			
	120 mm/menit			

(b)



Lampiran D

Bahasa pemrograman perangkat lunak MATLAB R2013a, untuk prediksi nilai respon dengan menggunakan BPNN adalah sebagai berikut:

```
clc, clear ,close all;

global net neuron1 neuron2 %neuron3 %neuron4 neuron5
% neuron6 neuron7 neuron8 neuron9 neuron10

variabel_proses = xlsread('Data.xlsx',1,'D3:F83');%(1=worksheet)
respon = xlsread('Data.xlsx',1,'G3:K83');

% variabel_proses = xlsread('Data.xlsx',2,'D3:F83');
% respon = xlsread('Data.xlsx',2,'G3:K83'); %(data normalisasi)

%=====
%% Metode Prediksi Back-propagation Neural Network
% Preprocessing data BPNN

p=variabel_proses';
t=respon';
%
[pn,ps]=mapminmax (p);
[tn,ts]=mapminmax (t);

%untuk 1 hidden layer

% xn= 3; % jumlah parameter proses
% neuron1= 15;
% yn = 4;

% untuk 2 hidden layer

xn= 3; % jumlah parameter proses
neuron1= 13;
neuron2= 13;
yn = 4;

%untuk 3 hidden layer

% xn= 3; % jumlah parameter proses
% neuron1= 24;
% neuron2= 24;
% neuron3= 24;
% yn = 4;

%untuk 4 hidden layer

% xn= 3; % jumlah parameter proses
% neuron1= 24;
% neuron2= 24;
% neuron3= 24;
```



```
% neuron4= 24;
% yn = 4;

%untuk 5 hidden layer

% xn= 3; % jumlah parameter proses
% neuron1= 24;
% neuron2= 24;
% neuron3= 24;
% neuron4= 24;
% neuron5= 24;
% yn = 4;

%Jaringan BPNN

%1 hidden layer
% net = newff(minmax(pn),tn,[neuron1],{'tansig','purelin'},
'trainlm');

%2 hidden layer
net = newff(minmax(pn),tn,[neuron1 neuron2],{'tansig','tansig',
'purelin'},'trainlm');

%3 hidden layer
% net = newff(minmax(pn),tn,[neuron1 neuron2 neuron3],{'tansig',
'tansig','tansig','purelin'},'trainlm');

%4 hidden layer
% net = newff(minmax(pn),tn,[neuron1 neuron2 neuron3 neuron4],
{'tansig','tansig','tansig','tansig','purelin'},'trainlm');

%5 hidden layer
% net = newff(minmax(pn),tn,[neuron1 neuron2 neuron3 neuron4
neuron5],{'tansig','tansig','tansig','tansig','tansig','purelin'},
'trainlm');

%kriteria pemberhentian
net.trainParam.epochs = 10000;
net.trainParam.time = 200;
net.trainParam.goal=1e-4;
net.trainParam.min_grad = 1e-5;
net.trainParam.max_fail = 1000;

%inisialisasi nilai bobot dan bias
net = init(net);

%Data pelatihan BPNN
net.divideParam.TrainRatio = 70/100;
net.divideParam.valRatio = 15/100;
net.divideParam.testRatio = 15/100;

%Laju pembelajaran
net.trainParam.lr=0.05; % learning Rate
net.trainParam.show= 10;
```



```
% Perubahan bobot dan bias
% net.trainParam.delt_inc = 1.2;
% net.trainParam.delt_dec = 0.5;
% net.trainParam.delta0 = 0.05;
% net.trainParam.deltamax = 50.0;

% Pelatihan Jaringan BPNN
[net, tr] = train(net, pn, tn);

%Menghitung Output BPNN
yn = sim(net,pn);
MSE=perform(net,tn,yn)

%Repreprocessing data BPNN
y = mapminmax ('reverse',yn,ts);
output =y';

%-----plot data full-----
% Grafik data eksperimen dan data output pelatihan BPNN

% % (a) gaya tekan
% subplot(2,2,1)
% plot([1:size(p',1)]', respon(:,1),'-bo',
[1:size(p',1)]',output(:,1),'-r*')
% legend('Eksperimen' , 'BPNN',2)
% grid on
% xlabel ('Data Ke- ');
% ylabel ('Gaya tekan (N)');
%
% % (b) torsi
% subplot (2,2,2)
% plot ([1:size(p',1)]',respon(:,2),'-bo', [1:size(p',1)]', output
(:,2),'-r*')
% legend('Eksperimen', 'BPNN',2)
% grid on
% xlabel ('Data Ke- ');
% ylabel ('Momen torsi (Nm)')
%
% % (c) kekasaran permukaan
% subplot(2,2,3)
% plot([1:size(p',1)]', respon(:,3),'-bo',
[1:size(p',1)]',output(:,3),'-r*')
% legend('Eksperimen' , 'BPNN',2)
% grid on
% xlabel ('Data Ke- ');
% ylabel ('Kekasaran permukaan lubang ( $\mu\text{m}$ )');
%
% % (c) Delaminasi
% subplot(2,2,4)
% plot([1:size(p',1)]', respon(:,4),'-bo',
[1:size(p',1)]',output(:,4),'-r*')
% legend('Eksperimen' , 'BPNN',2)
% grid on
% xlabel ('Data Ke- ');
% ylabel ('Delaminasi');
```



```
% -----plot data training-----

% % (a) gaya tekan
% subplot(2,2,1)
% plot([1:size(tr.trainInd',1)]', respon(tr.trainInd',1),'-bo',
% [1:size(tr.trainInd',1)]', output(tr.trainInd',1),'-r*')
% legend('Eksperimen' , 'BPNN',2)
% grid on
% xlabel ('Data Ke- ');
% ylabel ('Gaya tekan (N)');
%
% % (b) torsi
% subplot (2,2,2)
% plot ([1:size(tr.trainInd',1)]', respon(tr.trainInd',2),'-bo',
% [1:size(tr.trainInd',1)]', output (tr.trainInd',2),'-r*')
% legend('Eksperimen', 'BPNN',2)
% grid on
% xlabel ('Data Ke- ');
% ylabel ('Momen torsi (Nm)')
%
% % (c) kekasaran permukaan
% subplot(2,2,3)
% plot([1:size(tr.trainInd',1)]', respon(tr.trainInd',3),'-bo',
% [1:size(tr.trainInd',1)]', output(tr.trainInd',3),'-r*')
% legend('Eksperimen' , 'BPNN',2)
% grid on
% xlabel ('Data Ke- ');
% ylabel ('Kekasaran permukaan lubang ( $\mu\text{m}$ )');
%
% % (c) Delaminasi
% subplot(2,2,4)
% plot([1:size(tr.trainInd',1)]', respon(tr.trainInd',4),'-bo',
% [1:size(tr.trainInd',1)]', output(tr.trainInd',4),'-r*')
% legend('Eksperimen' , 'BPNN',2)
% grid on
% xlabel ('Data Ke- ');
% ylabel ('Delaminasi');

% %-----plot data testing-----
%
% % (a) gaya tekan
% subplot(2,2,1)
% plot([1:size(tr.testInd',1)]', respon(tr.testInd',1),'-bo',
% [1:size(tr.testInd',1)]', output(tr.testInd',1),'-r*')
% legend('Eksperimen' , 'BPNN',2)
% grid on
% xlabel ('Data Ke- ');
% ylabel ('Gaya tekan (N)');
%
% % % (b) torsi
% subplot (2,2,2)
% plot ([1:size(tr.testInd',1)]', respon(tr.testInd',2),'-bo',
% [1:size(tr.testInd',1)]', output (tr.testInd',2),'-r*')
% legend('Eksperimen', 'BPNN',2)
```



```
% grid on
% xlabel ('Data Ke- ');
% ylabel ('Momen torsi (Nm)')
%
% % (c) kekasaran permukaan
% subplot(2,2,3)
% plot([1:size(tr.testInd',1)]', respon(tr.testInd',3),'-bo',
[1:size(tr.testInd',1)]',output(tr.testInd',3),'-r*')
% legend('Eksperimen' , 'BPNN',2)
% grid on
% xlabel ('Data Ke- ');
% ylabel ('Kekasaran permukaan lubang ( $\mu\text{m}$ )');
%
% % (d) delaminasi
% subplot(2,2,4)
% plot([1:size(tr.testInd',1)]', respon(tr.testInd',4),'-bo',
[1:size(tr.testInd',1)]',output(tr.testInd',4),'-r*')
% legend('Eksperimen' , 'BPNN',2)
% grid on
% xlabel ('Data Ke- ');
% ylabel ('Delaminasi');

% -----plot data validasi-----

% % (a) gaya tekan
%
% subplot(2,2,1)
% plot([1:size(tr.valInd',1)]', respon(tr.valInd',1),'-bo',
[1:size(tr.valInd',1)]',output(tr.valInd',1),'-r*')
% legend('Eksperimen' , 'BPNN',2)
% grid on
% xlabel ('Data Ke- ');
% ylabel ('Gaya tekan (N)');
%
% % (b) torsi
% subplot(2,2,2)
% plot([1:size(tr.valInd',1)]',respon(tr.valInd',2),'-bo',
[1:size(tr.valInd',1)]', output(tr.valInd',2),'-r*')
% legend('Eksperimen', 'BPNN',2)
% grid on
% xlabel ('Data Ke- ');
% ylabel ('Momen torsi (Nm)')
%
% % (c) kekasaran permukaan
%
% subplot(2,2,3)
% plot([1:size(tr.valInd',1)]', respon(tr.valInd',3),'-bo',
[1:size(tr.valInd',1)]',output(tr.valInd',3),'-r*')
% legend('Eksperimen' , 'BPNN',2)
% grid on
% xlabel ('Data Ke- ');
% ylabel ('Kekasaran permukaan lubang ( $\mu\text{m}$ )');
%
% % (d) delaminasi
%
% subplot(2,2,4)
```



```
% plot([1:size(tr.valInd',1)]', respon(tr.valInd',4),'-bo',  
[1:size(tr.valInd',1)]',output(tr.valInd',4),'-r*')  
% legend('Eksperimen' , 'BPNN',2)  
% grid on  
% xlabel ('Data Ke- ');  
% ylabel ('Delaminasi');  
  
%%-----plot excel-----  
  
% A = mapminmax (t);  
% xlswrite('data_normalisasi.xls', respon, 'full', 'A1');  
% xlswrite('data_normalisasi.xls', A, 'full', 'F1');  
  
% xlswrite('data_prediksi_full_tesis.xls', respon, 'full', 'A1');  
% xlswrite('data_prediksi_full_tesis.xls', output, 'full', 'E1');  
%  
% xlswrite('data_prediksi_training_tesis.xls', tr.trainInd' ,  
'data training', 'A1');  
% xlswrite('data_prediksi_training_tesis.xls',  
respon(tr.trainInd',1) , 'data training', 'B1');  
% xlswrite('data_prediksi_training_tesis.xls',  
output(tr.trainInd',1) , 'data training', 'C1');  
% xlswrite('data_prediksi_training_tesis.xls',  
respon(tr.trainInd',2) , 'data training', 'D1');  
% xlswrite('data_prediksi_training_tesis.xls',  
output(tr.trainInd',2) , 'data training', 'E1');  
% xlswrite('data_prediksi_training_tesis.xls',  
respon(tr.trainInd',3) , 'data training', 'G1');  
% xlswrite('data_prediksi_training_tesis.xls',  
output(tr.trainInd',3) , 'data training', 'H1');  
% xlswrite('data_prediksi_training_tesis.xls',  
respon(tr.trainInd',4) , 'data training', 'I1');  
% xlswrite('data_prediksi_training_tesis.xls',  
output(tr.trainInd',4) , 'data training', 'J1');  
%  
% xlswrite('data_prediksi_tesis.xls', tr.testInd' , 'data  
testing', 'A1');  
% xlswrite('data_prediksi_tesis.xls', respon(tr.testInd',1) ,  
'data testing', 'B1');  
% xlswrite('data_prediksi_tesis.xls', output(tr.testInd',1) ,  
'data testing', 'C1');  
% xlswrite('data_prediksi_tesis.xls', respon(tr.testInd',2) ,  
'data testing', 'D1');  
% xlswrite('data_prediksi_tesis.xls', output(tr.testInd',2) ,  
'data testing', 'E1');  
% xlswrite('data_prediksi_tesis.xls', respon(tr.testInd',3) ,  
'data testing', 'G1');  
% xlswrite('data_prediksi_tesis.xls', output(tr.testInd',3) ,  
'data testing', 'H1');  
% xlswrite('data_prediksi_tesis.xls', respon(tr.testInd',4) ,  
'data testing', 'I1');  
% xlswrite('data_prediksi_tesis.xls', output(tr.testInd',4) ,  
'data testing', 'J1');  
%
```




```
% xlswrite('data_prediksi_tesis.xls', tr.valInd' , 'data
validasi', 'A1');
% xlswrite('data_prediksi_tesis.xls', respon(tr.valInd',1) , 'data
validasi', 'B1');
% xlswrite('data_prediksi_tesis.xls', output(tr.valInd',1) , 'data
validasi', 'C1');
% xlswrite('data_prediksi_tesis.xls', respon(tr.valInd',2) , 'data
validasi', 'D1');
% xlswrite('data_prediksi_tesis.xls', output(tr.valInd',2) , 'data
validasi', 'E1');
% xlswrite('data_prediksi_tesis.xls', respon(tr.valInd',3) , 'data
validasi', 'G1');
% xlswrite('data_prediksi_tesis.xls', output(tr.valInd',3) , 'data
validasi', 'H1');
% xlswrite('data_prediksi_tesis.xls', respon(tr.valInd',4) , 'data
validasi', 'I1');
% xlswrite('data_prediksi_tesis.xls', output(tr.valInd',4) , 'data
validasi', 'J1');
```



Lampiran E

Bahasa pemrograman perangkat lunak MATLAB R2013a, untuk penentuan fungsi fitness adalah sebagai berikut:

```
function fitness = FitnessDRILLING(x)
global net %neuron1 neuron2

%Nilai Akhir Bobot dan Bias

% u = net.IW{1,1};
% v = net.LW{2,1};
% w = net.LW{3,2};
%
% u0= net.b{1};
% v0= net.b{2};
% w0 =net.b{3};

%% Data bobot dan bias

u =[
    2.6365    -1.9302    -0.4089
   -2.6576     2.0154    -0.2719
    1.3749     1.4253    -2.9007
   -0.4281    -2.0193     2.0390
    2.0186     2.5186     0.0571
    0.1535    -1.4903    -3.0210
    1.0651     2.3864     2.0197
    2.3932    -1.7081     0.9887
   -2.5513     2.1770    -0.2698
    2.0962     3.0541     0.1027
   -0.9512    -2.4953    -2.0903
   -1.8559    -1.2842     2.5605
   -1.9888    -2.1383    -1.7711];

v =[
   -0.1335   -0.4516   -0.5149   -0.6201   -0.4525   -0.1172   -
  0.5852   -0.5186   0.8764   0.5870   -0.4695   0.3429   0.0733
  0.1183   0.7757   -0.8003   0.6031   -0.3567   0.5007   -
  0.7340   0.5139   -0.7617   0.7151   -0.3537   -0.2627   0.1138
   0.1227   0.4417   -0.5985   0.3476   0.2951   -0.2662
  0.4204   0.0563   0.0978   0.5936   -0.2372   0.2586   -0.0616
   -0.8847   0.0603   0.2276   0.0096   0.8687   0.3863
  0.2180   0.3303   -0.1137   0.1333   -0.4157   -0.3449   -0.5690
   -0.3356   -0.2180   -0.7219   0.0169   -0.1300   0.6852
  0.1814   0.2830   0.1328   -0.0522   0.5237   0.4364   -0.0987
   -0.2538   -0.7028   0.8363   0.6508   -0.7545   0.1276   -
  0.2704   -0.5664   0.4300   0.3420   0.8109   0.8369   0.1972
   -1.0837   -0.7666   0.3801   -0.4625   -0.4984   -0.1882   -
  0.7887   0.2402   0.5967   1.0585   -0.1405   -0.7541   0.7912
   0.7290   -0.4846   0.0110   0.4190   0.4166   -0.0743   -
  0.3186   -0.0805   -0.0445   -0.4178   -0.3030   -0.3719   0.5219
   -0.6139   0.3815   0.3098   0.6616   -0.0600   -0.5512   -
  0.7697   0.1038   -0.2761   0.0741   0.0380   -0.6719   0.4766
   -0.0840   0.4750   -0.0683   0.5875   -0.1406   0.2573
  0.3200   0.6844   0.4435   -0.3059   -0.1329   -0.7072   -0.3968
```



```
0.9527    0.0734    0.0528    0.0990    0.0832    0.2658    -  
0.4306   -0.2742    0.0327    0.6857   -0.6292   -0.2169    0.8771  
-0.6075   -0.5807   -0.9942    0.1168    0.2077    0.1364    -  
0.3016    0.8677    0.2442   -0.3066   -0.5873   -0.8579   -0.2335  
-0.5125   -0.3013    0.6744   -0.7346   -0.2887   -0.2162  
0.3941   -0.6364   -0.4389   -0.4809   -0.8904   -0.6087    -  
0.8930];
```

```
w = [  
0.4545   -0.1247    0.8535    0.1264   -0.5691    0.0564    -  
0.0591   -0.0175    0.1911    0.5156   -0.0609   -0.4379   -0.6435  
0.6317   -0.6896    0.3763    0.0426    0.5216   -0.5906    -  
0.5010    0.2185    1.2191    0.5553    0.7038   -0.9254    0.0351  
0.8783   -0.0726    0.1599   -0.2502   -0.2959   -0.1531  
0.1825   -0.3416   -0.0090    0.5179    0.0312   -0.2871   -0.4888  
-0.1517    0.2440   -0.1630    0.0810   -0.0181   -0.1379    -  
0.5715   -0.1006   -0.1634   -0.0079    0.2683   -0.0317    -  
0.0954];
```

```
u0 = [  
-3.2242  
2.6537  
-2.4203  
1.8960  
-0.9326  
0.5169  
-0.0882  
0.8148  
-0.7813  
1.1144  
-2.0176  
-2.8265  
-3.1461];
```

```
v0 = [  
-1.6578  
-1.3652  
1.2658  
0.8683  
0.4236  
0.2469  
0.1255  
0.2528  
-0.3853  
-0.7652  
0.9233  
-1.4140  
-1.4601];
```

```
w0 = [  
-0.7932  
-0.8961  
-0.0107  
-0.3748];
```



%persamaan fitness

%-----manual-----

% input layer ke hidden layer 1

```
z1=u(1,1)*x(1)+u(1,2)*x(2)+u(1,3)*x(3)+u0(1,1);
z2=u(2,1)*x(1)+u(2,2)*x(2)+u(2,3)*x(3)+u0(2,1);
z3=u(3,1)*x(1)+u(3,2)*x(2)+u(3,3)*x(3)+u0(3,1);
z4=u(4,1)*x(1)+u(4,2)*x(2)+u(4,3)*x(3)+u0(4,1);
z5=u(5,1)*x(1)+u(5,2)*x(2)+u(5,3)*x(3)+u0(5,1);
z6=u(6,1)*x(1)+u(6,2)*x(2)+u(6,3)*x(3)+u0(6,1);
z7=u(7,1)*x(1)+u(7,2)*x(2)+u(7,3)*x(3)+u0(7,1);
z8=u(8,1)*x(1)+u(8,2)*x(2)+u(8,3)*x(3)+u0(8,1);
z9=u(9,1)*x(1)+u(9,2)*x(2)+u(9,3)*x(3)+u0(9,1);
z10=u(10,1)*x(1)+u(10,2)*x(2)+u(10,3)*x(3)+u0(10,1);
z11=u(11,1)*x(1)+u(11,2)*x(2)+u(11,3)*x(3)+u0(11,1);
z12=u(12,1)*x(1)+u(12,2)*x(2)+u(12,3)*x(3)+u0(12,1);
z13=u(13,1)*x(1)+u(13,2)*x(2)+u(13,3)*x(3)+u0(13,1);
```

% hidden layer 1 ke hidden layer 2

```
zz1=(v(1,1)*((2/(1+exp(-2*z1)))-1)+ v(1,2)*((2/(1+exp(-2*z2)))-1)+
v(1,3)*((2/(1+exp(-2*z3)))-1)+ v(1,4)*((2/(1+exp(-2*z4)))-1)+
v(1,5)*((2/(1+exp(-2*z5)))-1)+ v(1,6)*((2/(1+exp(-2*z6)))-1)+
v(1,7)*((2/(1+exp(-2*z7)))-1)+ v(1,8)*((2/(1+exp(-2*z8)))-
1)+v(1,9)*((2/(1+exp(-2*z9)))-1)+ v(1,10)*((2/(1+exp(-2*z10)))-1)+
v(1,11)*((2/(1+exp(-2*z11)))-1)+ v(1,12)*((2/(1+exp(-2*z12)))-1)+
v(1,13)*((2/(1+exp(-2*z13)))-1)+ v0(1,1));
```

```
zz2=(v(2,1)*((2/(1+exp(-2*z1)))-1)+ v(2,2)*((2/(1+exp(-2*z2)))-1)+
v(2,3)*((2/(1+exp(-2*z3)))-1)+ v(2,4)*((2/(1+exp(-2*z4)))-1)+
v(2,5)*((2/(1+exp(-2*z5)))-1)+ v(2,6)*((2/(1+exp(-2*z6)))-1)+
v(2,7)*((2/(1+exp(-2*z7)))-1)+ v(2,8)*((2/(1+exp(-2*z8)))-
1)+v(2,9)*((2/(1+exp(-2*z9)))-1)+ v(2,10)*((2/(1+exp(-2*z10)))-1)+
v(2,11)*((2/(1+exp(-2*z11)))-1)+ v(2,12)*((2/(1+exp(-2*z12)))-1)+
v(2,13)*((2/(1+exp(-2*z13)))-1)+ v0(2,1));
```

```
zz3=(v(3,1)*((2/(1+exp(-2*z1)))-1)+ v(3,2)*((2/(1+exp(-2*z2)))-1)+
v(3,3)*((2/(1+exp(-2*z3)))-1)+ v(3,4)*((2/(1+exp(-2*z4)))-1)+
v(3,5)*((2/(1+exp(-2*z5)))-1)+ v(3,6)*((2/(1+exp(-2*z6)))-1)+
v(3,7)*((2/(1+exp(-2*z7)))-1)+ v(3,8)*((2/(1+exp(-2*z8)))-
1)+v(3,9)*((2/(1+exp(-2*z9)))-1)+ v(3,10)*((2/(1+exp(-2*z10)))-1)+
v(3,11)*((2/(1+exp(-2*z11)))-1)+ v(3,12)*((2/(1+exp(-2*z12)))-1)+
v(3,13)*((2/(1+exp(-2*z13)))-1)+ v0(3,1));
```

```
zz4=(v(4,1)*((2/(1+exp(-2*z1)))-1)+ v(4,2)*((2/(1+exp(-2*z2)))-1)+
v(4,3)*((2/(1+exp(-2*z3)))-1)+ v(4,4)*((2/(1+exp(-2*z4)))-1)+
v(4,5)*((2/(1+exp(-2*z5)))-1)+ v(4,6)*((2/(1+exp(-2*z6)))-1)+
v(4,7)*((2/(1+exp(-2*z7)))-1)+ v(4,8)*((2/(1+exp(-2*z8)))-
1)+v(4,9)*((2/(1+exp(-2*z9)))-1)+ v(4,10)*((2/(1+exp(-2*z10)))-1)+
v(4,11)*((2/(1+exp(-2*z11)))-1)+ v(4,12)*((2/(1+exp(-2*z12)))-1)+
v(4,13)*((2/(1+exp(-2*z13)))-1)+ v0(4,1));
```

```
zz5=(v(5,1)*((2/(1+exp(-2*z1)))-1)+ v(5,2)*((2/(1+exp(-2*z2)))-1)+
v(5,3)*((2/(1+exp(-2*z3)))-1)+ v(5,4)*((2/(1+exp(-2*z4)))-1)+
```



$$\begin{aligned} &v(5,5)*((2/(1+\exp(-2*z5)))-1)+v(5,6)*((2/(1+\exp(-2*z6)))-1)+ \\ &v(5,7)*((2/(1+\exp(-2*z7)))-1)+v(5,8)*((2/(1+\exp(-2*z8)))- \\ &1)+v(5,9)*((2/(1+\exp(-2*z9)))-1)+v(5,10)*((2/(1+\exp(-2*z10)))-1)+ \\ &v(5,11)*((2/(1+\exp(-2*z11)))-1)+v(5,12)*((2/(1+\exp(-2*z12)))-1)+ \\ &v(5,13)*((2/(1+\exp(-2*z13)))-1)+v_0(5,1)); \end{aligned}$$
$$\begin{aligned} zz6=&(v(6,1)*((2/(1+\exp(-2*z1)))-1)+v(6,2)*((2/(1+\exp(-2*z2)))-1)+ \\ &v(6,3)*((2/(1+\exp(-2*z3)))-1)+v(6,4)*((2/(1+\exp(-2*z4)))-1)+ \\ &v(6,5)*((2/(1+\exp(-2*z5)))-1)+v(6,6)*((2/(1+\exp(-2*z6)))-1)+ \\ &v(6,7)*((2/(1+\exp(-2*z7)))-1)+v(6,8)*((2/(1+\exp(-2*z8)))- \\ &1)+v(6,9)*((2/(1+\exp(-2*z9)))-1)+v(6,10)*((2/(1+\exp(-2*z10)))-1)+ \\ &v(6,11)*((2/(1+\exp(-2*z11)))-1)+v(6,12)*((2/(1+\exp(-2*z12)))-1)+ \\ &v(6,13)*((2/(1+\exp(-2*z13)))-1)+v_0(6,1)); \end{aligned}$$
$$\begin{aligned} zz7=&(v(7,1)*((2/(1+\exp(-2*z1)))-1)+v(7,2)*((2/(1+\exp(-2*z2)))-1)+ \\ &v(7,3)*((2/(1+\exp(-2*z3)))-1)+v(7,4)*((2/(1+\exp(-2*z4)))-1)+ \\ &v(7,5)*((2/(1+\exp(-2*z5)))-1)+v(7,6)*((2/(1+\exp(-2*z6)))-1)+ \\ &v(7,7)*((2/(1+\exp(-2*z7)))-1)+v(7,8)*((2/(1+\exp(-2*z8)))- \\ &1)+v(7,9)*((2/(1+\exp(-2*z9)))-1)+v(7,10)*((2/(1+\exp(-2*z10)))-1)+ \\ &v(7,11)*((2/(1+\exp(-2*z11)))-1)+v(7,12)*((2/(1+\exp(-2*z12)))-1)+ \\ &v(7,13)*((2/(1+\exp(-2*z13)))-1)+v_0(7,1)); \end{aligned}$$
$$\begin{aligned} zz8=&(v(8,1)*((2/(1+\exp(-2*z1)))-1)+v(8,2)*((2/(1+\exp(-2*z2)))-1)+ \\ &v(8,3)*((2/(1+\exp(-2*z3)))-1)+v(8,4)*((2/(1+\exp(-2*z4)))-1)+ \\ &v(8,5)*((2/(1+\exp(-2*z5)))-1)+v(8,6)*((2/(1+\exp(-2*z6)))-1)+ \\ &v(8,7)*((2/(1+\exp(-2*z7)))-1)+v(8,8)*((2/(1+\exp(-2*z8)))- \\ &1)+v(8,9)*((2/(1+\exp(-2*z9)))-1)+v(8,10)*((2/(1+\exp(-2*z10)))-1)+ \\ &v(8,11)*((2/(1+\exp(-2*z11)))-1)+v(8,12)*((2/(1+\exp(-2*z12)))-1)+ \\ &v(8,13)*((2/(1+\exp(-2*z13)))-1)+v_0(8,1)); \end{aligned}$$
$$\begin{aligned} zz9=&(v(9,1)*((2/(1+\exp(-2*z1)))-1)+v(9,2)*((2/(1+\exp(-2*z2)))-1)+ \\ &v(9,3)*((2/(1+\exp(-2*z3)))-1)+v(9,4)*((2/(1+\exp(-2*z4)))-1)+ \\ &v(9,5)*((2/(1+\exp(-2*z5)))-1)+v(9,6)*((2/(1+\exp(-2*z6)))-1)+ \\ &v(9,7)*((2/(1+\exp(-2*z7)))-1)+v(9,8)*((2/(1+\exp(-2*z8)))- \\ &1)+v(9,9)*((2/(1+\exp(-2*z9)))-1)+v(9,10)*((2/(1+\exp(-2*z10)))-1)+ \\ &v(9,11)*((2/(1+\exp(-2*z11)))-1)+v(9,12)*((2/(1+\exp(-2*z12)))-1)+ \\ &v(9,13)*((2/(1+\exp(-2*z13)))-1)+v_0(9,1)); \end{aligned}$$
$$\begin{aligned} zz10=&(v(10,1)*((2/(1+\exp(-2*z1)))-1)+v(10,2)*((2/(1+\exp(-2*z2)))- \\ &1)+v(10,3)*((2/(1+\exp(-2*z3)))-1)+v(10,4)*((2/(1+\exp(-2*z4)))- \\ &1)+v(10,5)*((2/(1+\exp(-2*z5)))-1)+v(10,6)*((2/(1+\exp(-2*z6)))- \\ &1)+v(10,7)*((2/(1+\exp(-2*z7)))-1)+v(10,8)*((2/(1+\exp(-2*z8)))- \\ &1)+v(10,9)*((2/(1+\exp(-2*z9)))-1)+v(10,10)*((2/(1+\exp(-2*z10)))- \\ &1)+v(10,11)*((2/(1+\exp(-2*z11)))-1)+v(10,12)*((2/(1+\exp(- \\ &2*z12)))-1)+v(10,13)*((2/(1+\exp(-2*z13)))-1)+v_0(10,1)); \end{aligned}$$
$$\begin{aligned} zz11=&(v(11,1)*((2/(1+\exp(-2*z1)))-1)+v(11,2)*((2/(1+\exp(-2*z2)))- \\ &1)+v(11,3)*((2/(1+\exp(-2*z3)))-1)+v(11,4)*((2/(1+\exp(-2*z4)))- \\ &1)+v(11,5)*((2/(1+\exp(-2*z5)))-1)+v(11,6)*((2/(1+\exp(-2*z6)))- \\ &1)+v(11,7)*((2/(1+\exp(-2*z7)))-1)+v(11,8)*((2/(1+\exp(-2*z8)))- \\ &1)+v(11,9)*((2/(1+\exp(-2*z9)))-1)+v(11,10)*((2/(1+\exp(-2*z10)))- \\ &1)+v(11,11)*((2/(1+\exp(-2*z11)))-1)+v(11,12)*((2/(1+\exp(- \\ &2*z12)))-1)+v(11,13)*((2/(1+\exp(-2*z13)))-1)+v_0(11,1)); \end{aligned}$$
$$\begin{aligned} zz12=&(v(12,1)*((2/(1+\exp(-2*z1)))-1)+v(12,2)*((2/(1+\exp(-2*z2)))- \\ &1)+v(12,3)*((2/(1+\exp(-2*z3)))-1)+v(12,4)*((2/(1+\exp(-2*z4)))- \\ &1)+v(12,5)*((2/(1+\exp(-2*z5)))-1)+v(12,6)*((2/(1+\exp(-2*z6)))- \end{aligned}$$



```
1)+ v(12,7)*((2/(1+exp(-2*z7)))-1)+ v(12,8)*((2/(1+exp(-2*z8)))-1)+v(12,9)*((2/(1+exp(-2*z9)))-1)+ v(12,10)*((2/(1+exp(-2*z10)))-1)+ v(12,11)*((2/(1+exp(-2*z11)))-1)+ v(12,12)*((2/(1+exp(-2*z12)))-1)+ v(12,13)*((2/(1+exp(-2*z13)))-1)+ v0(12,1));
```

```
zz13=(v(13,1)*((2/(1+exp(-2*z1)))-1)+ v(13,2)*((2/(1+exp(-2*z2)))-1)+ v(13,3)*((2/(1+exp(-2*z3)))-1)+ v(13,4)*((2/(1+exp(-2*z4)))-1)+ v(13,5)*((2/(1+exp(-2*z5)))-1)+ v(13,6)*((2/(1+exp(-2*z6)))-1)+ v(13,7)*((2/(1+exp(-2*z7)))-1)+ v(13,8)*((2/(1+exp(-2*z8)))-1)+v(13,9)*((2/(1+exp(-2*z9)))-1)+ v(13,10)*((2/(1+exp(-2*z10)))-1)+ v(13,11)*((2/(1+exp(-2*z11)))-1)+ v(13,12)*((2/(1+exp(-2*z12)))-1)+ v(13,13)*((2/(1+exp(-2*z13)))-1)+ v0(13,1));
```

```
% hidden layer 2 ke output layer
```

```
FZ=(w(1,1)*((2/(1+exp(-2*zz1)))-1)+ w(1,2)*((2/(1+exp(-2*zz2)))-1)+ w(1,3)*((2/(1+exp(-2*zz3)))-1)+ w(1,4)*((2/(1+exp(-2*zz4)))-1)+ w(1,5)*((2/(1+exp(-2*zz5)))-1)+ w(1,6)*((2/(1+exp(-2*zz6)))-1)+ w(1,7)*((2/(1+exp(-2*zz7)))-1)+ w(1,8)*((2/(1+exp(-2*zz8)))-1)+w(1,9)*((2/(1+exp(-2*zz9)))-1)+ w(1,10)*((2/(1+exp(-2*zz10)))-1)+ w(1,11)*((2/(1+exp(-2*zz11)))-1)+ w(1,12)*((2/(1+exp(-2*zz12)))-1)+ w(1,13)*((2/(1+exp(-2*zz13)))-1)+ w0(1,1));
```

```
MZ=(w(2,1)*((2/(1+exp(-2*zz1)))-1)+ w(2,2)*((2/(1+exp(-2*zz2)))-1)+ w(2,3)*((2/(1+exp(-2*zz3)))-1)+ w(2,4)*((2/(1+exp(-2*zz4)))-1)+ w(2,5)*((2/(1+exp(-2*zz5)))-1)+ w(2,6)*((2/(1+exp(-2*zz6)))-1)+ w(2,7)*((2/(1+exp(-2*zz7)))-1)+ w(2,8)*((2/(1+exp(-2*zz8)))-1)+w(2,9)*((2/(1+exp(-2*zz9)))-1)+ w(2,10)*((2/(1+exp(-2*zz10)))-1)+ w(2,11)*((2/(1+exp(-2*zz11)))-1)+ w(2,12)*((2/(1+exp(-2*zz12)))-1)+ w(2,13)*((2/(1+exp(-2*zz13)))-1)+ w0(2,1));
```

```
SR=(w(3,1)*((2/(1+exp(-2*zz1)))-1)+ w(3,2)*((2/(1+exp(-2*zz2)))-1)+ w(3,3)*((2/(1+exp(-2*zz3)))-1)+ w(3,4)*((2/(1+exp(-2*zz4)))-1)+ w(3,5)*((2/(1+exp(-2*zz5)))-1)+ w(3,6)*((2/(1+exp(-2*zz6)))-1)+ w(3,7)*((2/(1+exp(-2*zz7)))-1)+ w(3,8)*((2/(1+exp(-2*zz8)))-1)+w(3,9)*((2/(1+exp(-2*zz9)))-1)+ w(3,10)*((2/(1+exp(-2*zz10)))-1)+ w(3,11)*((2/(1+exp(-2*zz11)))-1)+ w(3,12)*((2/(1+exp(-2*zz12)))-1)+ w(3,13)*((2/(1+exp(-2*zz13)))-1)+ w0(3,1));
```

```
D =(w(4,1)*((2/(1+exp(-2*zz1)))-1)+ w(4,2)*((2/(1+exp(-2*zz2)))-1)+ w(4,3)*((2/(1+exp(-2*zz3)))-1)+ w(4,4)*((2/(1+exp(-2*zz4)))-1)+ w(4,5)*((2/(1+exp(-2*zz5)))-1)+ w(4,6)*((2/(1+exp(-2*zz6)))-1)+ w(4,7)*((2/(1+exp(-2*zz7)))-1)+ w(4,8)*((2/(1+exp(-2*zz8)))-1)+w(4,9)*((2/(1+exp(-2*zz9)))-1)+ w(4,10)*((2/(1+exp(-2*zz10)))-1)+ w(4,11)*((2/(1+exp(-2*zz11)))-1)+ w(4,12)*((2/(1+exp(-2*zz12)))-1)+ w(4,13)*((2/(1+exp(-2*zz13)))-1)+ w0(4,1));
```

```
% persamaan fitness
```

```
fitness = min(FZ+MZ+SR+D);
```



Lampiran F

Bahasa pemrograman perangkat lunak MATLAB R2013a, untuk optimasi dengan menggunakan metode GA adalah sebagai berikut:

```
%clc, clear ,close all;

% % %-----optimasi algoritma genetika-----%

% % menentukan batas atas dan batas bawah untuk dioptimasi%

lb = [600 60 1];%(1=118, 2=130, 3= 140)
ub = [2400 120 3];

% menentukan opsi optimasi GA
options =gaoptimset(...
    'PopulationSize',100,...
    'Generations',100,...
    'SelectionFcn',@selectionroulette,...
    'CrossoverFcn',@crossovertwopoint,...
    'CrossoverFraction',0.8,...
    'MutationFcn',@mutationuniform,...
    'MigrationFraction',0.05,...
    'ParetoFraction',0.35,...
    'PlotFcn',{@gaplotbestf});

% menganalisis nilai maksimum pelatihan GA

[setting_terbaik,fbest,exitflag] =
ga(@FitnessDRILLING,3,[],[],[],[],lb,ub,[],[1 2 3],options);

%-----menampilkan setting terbaik GA-----%

display(setting_terbaik);

%-----menampilkan prediksi respon BPNN-----%

% setting_terbaik=[2343 61 1]
norm1 = (2*(setting_terbaik(1,1)-600)/(2400-600))-1;
norm2 = (2*(setting_terbaik(1,2)-60)/(120-60))-1;
norm3 = (2*(setting_terbaik(1,3)-1)/(3-1))-1;
n=[norm1 norm2 norm3];
yb=sim(net,n');
Respon_Optimal = mapminmax('reverse',yb,ts)
```



BIOGRAFI PENULIS



Angga Sateria, Dilahirkan dikota Sungailiat-Bangka pada tanggal 22 mei 1988. Penulis merupakan anak kedelapan dari sembilan bersaudara dari pasangan Bapak Suratno Sawiyo dan Ibu Anisah. Penulis memulai pendidikannya di SD Negeri 2 Sungailiat-Bangka pada tahun 1994-2000, SMP Negeri 1 Sungailiat-Bangka pada tahun 2000-2003, dan SMA Negeri 1 Sungailiat-Bangka pada tahun 2003-2006. Pada tahun yang 2006, penulis melanjutkan pendidikan D3 selama 3 tahun di Politeknik Manufaktur Negeri Bangka Belitung jurusan Teknik Mesin program studi Teknik Perawatan dan Perbaikan Mesin. Pada tahun 2011, Penulis melanjutkan pendidikan D4 di Politeknik Manufaktur Negeri Bandung jurusan Teknik Mesin program studi Teknik Mesin dan Manufaktur. Gelar Sarjana Sains Terapan diperoleh setelah menamatkan pendidikannya pada tahun 2013. Pada tahun 2015, Penulis melanjutkan studi S2 di Institut Teknologi Sepuluh Nopember jurusan Teknik Mesin program studi Rekayasa Sistem Manufaktur. Penulis bekerja sebagai dosen tetap di Politeknik Manufaktur Negeri Bangka-Belitung jurusan Teknik Mesin program studi Perawatan dan Perbaikan Mesin, sejak tahun 2009 sampai sekarang. Pada pelaksanaan tesis, penulis melakukan penelitian yang berjudul “Optimasi Multi Respon Proses Gurdi *Glass Fiber Reinforced Polymer (GFRP)-Stainless Steel Stacks* Dengan Metode *Backpropagation Neural Network–Genetic Algorithm (BPNN-GA)*”.



[Halaman ini sengaja dikosongkan]